



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
Departamento de Tecnología Electrónica

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA  
Trabajo de Fin de Grado

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN ENCODER ÓPTICO CON  
INTERROGACIÓN REMOTA PARA LA MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE  
GIRO Y ÁNGULO DE PASO EN AEROGENERADORES**

AUTORA: Ana Orta M<sup>c</sup>Guinness

DIRECTOR: David Sánchez Montero

Febrero 2017



# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	9
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	10
1.2. CONTENIDOS.....	13
CAPÍTULO 2: AEROGENERADORES.....	15
CAPÍTULO 3: SENSORES ÓPTICOS.....	19
3.1. FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO (POF).....	19
3.2. SENSORES ÓPTICOS.....	24
3.2.1. SEGÚN SU PRINCIPIO DE TRANSDUCCIÓN. ....	25
3.2.2. SEGÚN SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL.....	26
3.2.3. SEGÚN LA VARIABLE FÍSICA MEDIDA .....	27
3.2.4. TIPO DE MODULACIÓN.....	28
CAPÍTULO 4: COMUNICACIONES INALÁMBRICAS.....	30
4.1. BLUETOOTH.....	31
4.2. WIFI .....	32
4.3. ZIGBEE .....	33
CAPÍTULO 5: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA .....	36
CAPÍTULO 6: DISEÑO Y DESARROLLO DEL SENSOR ÓPTICO.....	42
6.1. DRIVER EMISOR.....	42
6.1.1. ELECCIÓN DEL LED.....	42
6.1.1.1. TRANSMISIÓN POR POF SEGÚN LA LONGITUD DE ONDA DE OPERACIÓN .....	43
6.1.1.2. RESPUESTA DEL FOTODIODO SEGÚN LA LONGITUD DE ONDA DE OPERACIÓN .....	44
6.1.1.3. ELECCIÓN DEL MODELO DE LA FUENTE DE LUZ LED .....	45
6.1.2. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO PROPUESTO: DRIVER EMISOR .....	46
6.1.2.1. MODULACIÓN ANALÓGICA .....	52
6.1.3. CARACTERIZACIÓN ELECTRÓNICA.....	54

6.1.3.1.	SIMULACIONES .....	54
6.1.3.2.	PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	56
6.1.3.3.	CONCLUSIONES .....	57
6.1.4.	CARACTERIZACIÓN ÓPTICA .....	57
6.2.	DRIVER RECEPTOR .....	60
6.2.1.	CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO PROPUESTO: DRIVER RECEPTOR .....	60
6.2.1.1.	ETAPA INVERSORA .....	66
CAPÍTULO 7: DISEÑO Y DESARROLLO DEL ENCODER ÓPTICO .....		69
7.1.	ESTUDIO DE LA REFLEXIÓN DE LA LUZ .....	71
7.2.	CARACTERIZACIÓN .....	79
CAPÍTULO 8: INTERROGACIÓN REMOTA.....		81
8.1.	ARDUINO UNO .....	82
8.1.1.	CÓDIGO ARDUINO .....	84
8.2.	MÓDULOS XBEE.....	86
8.2.1.	CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE .....	87
8.3.	LABVIEW.....	93
8.3.1.	PROGRAMA LABVIEW .....	94
8.3.1.1.	PANEL FRONTAL .....	98
8.3.1.2.	DIAGRAMA DE BLOQUES.....	99
8.3.1.2.1.	CASO “Decidir X” .....	104
8.3.1.2.2.	CASO “Negro” .....	110
8.3.1.2.3.	CASO “RPM” .....	111
8.3.1.2.4.	CASO “Print” .....	113
8.3.1.2.5.	CASO “Fin” .....	114
8.4.	MEDIDAS OBTENIDAS.....	115
CAPÍTULO 9: PRESUPUESTO .....		121
CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....		124
CAPÍTULO 11: BIBLIOGRAFÍA.....		127
ANEXOS .....		131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del sensor de fibra óptica diseñado.....	11
Figura 2: Esquema de funcionamiento de la interrogación remota del sistema.....	12
Figura 3: Aerogenerador AW3000 .....	16
Figura 4: Partes de un aerogenerador .....	16
Figura 5: Curva de potencia de un aerogenerador de 600 kW .....	17
Figura 6: Partes de una POF .....	20
Figura 7: Perfiles de índice de refracción en fibra óptica.....	21
Figura 8: Perfil de atenuación de una POF.....	22
Figura 9: Esquemático de sensores ópticos basados en POF de tipo extrínseco (superior) e intrínseco (inferior) .....	25
Figura 10: Respuesta espectral de un sensor óptico FBG .....	25
Figura 11: Fenómeno de retrodispersión de la luz en una fibra óptica .....	27
Figura 12: Logo de Bluetooth .....	31
Figura 13: Localización de la frecuencia de trabajo de Bluetooth en el espectro de radiofrecuencia .....	31
Figura 14: Conexión tipo piconet (izquierda) y scatternet de Bluetooth.....	32
Figura 15: Logo WiFi.....	32
Figura 16: Arquitectura Ad-Hoc (izquierda) y sistema distribuido (derecha) en comunicación WiFi .....	33
Figura 17: Logo ZigBee .....	33
Figura 18: Topologías de ZigBee.....	34
Figura 19: Funcionamiento de los routers de ZigBee (I) .....	34
Figura 20: Funcionamiento de los routers de ZigBee (II) .....	35
Figura 21: Funcionamiento de los routers de ZigBee (III) .....	35
Figura 22: Aspecto real del driver emisor y el driver receptor del FOS diseñado.....	36
Figura 23: Vista de planta de la plataforma de soporte, motor y encoder usados en el sistema de reflexión de luz.....	37
Figura 24: Vista de perfil de la plataforma de soporte, motor y encoder usados en el sistema de reflexión de luz.....	38
Figura 25: Detalle de la plataforma de conversión giro – movimiento lineal .....	38
Figura 26: Vista de perfil de la plataforma de soporte, rodamiento y encoder usados en el sistema de reflexión de luz.....	39
Figura 27: Distancia de reflexión entre los extremos de las POF y el encoder diseñado .....	39
Figura 28: Aspecto del módulo Arduino-Xbee emisor .....	40
Figura 29: Aspecto del módulo Arduino-Xbee receptor .....	40
Figura 30: Panel frontal del programa LabVIEW diseñado .....	41
Figura 31: Recorrido del haz de luz .....	42
Figura 32: Fotodiodo IF-D91.....	44
Figura 33: Respuesta del fotodiodo según la longitud de onda incidente.....	45

Figura 34: LED IF-E97 .....	46
Figura 35: Circuito propuesto del driver emisor .....	47
Figura 36: Zonas de funcionamiento de un transistor bipolar .....	48
Figura 37: Valores comerciales de las resistencias .....	50
Figura 38: Circuito con valores del driver emisor .....	51
Figura 39: Circuito en pequeña señal anulando las fuentes de tensión .....	52
Figura 40: Circuito en pequeña señal anulando las fuentes de tensión reducido .....	53
Figura 41: Driver emisor con valores y posibilidad de modulación .....	53
Figura 42: Circuito de simulación en Multisim .....	55
Figura 43: Circuito con valores reales dibujado con Multisim .....	56
Figura 44: Mecanismo de medición de potencia óptica del LED IF-E97 .....	58
Figura 45: Circuito sin valores del driver receptor .....	60
Figura 46: Circuito con valores del driver receptor .....	65
Figura 47: Onda sinusoidal acoplada a $V_o'$ por la luz fluorescente del laboratorio .....	66
Figura 48: Etapa inversora sin valores del driver receptor .....	66
Figura 49: Circuito de la etapa inversora del driver receptor con valores .....	67
Figura 50: Circuito con valores del driver receptor .....	68
Figura 51: Descripción del ángulo de ataque (izquierda) y ángulo de paso (derecha) .....	70
Figura 52: Marcas del codificador óptico diseñado y su respectiva leyenda .....	71
Figura 53: Gráfica cuasi-estándar de funcionamiento de reflexión en función de la distancia de reflexión .....	72
Figura 54: Plantilla con cuatro tonalidades de gris para el estudio de $V_o'$ según la distancia de reflexión .....	74
Figura 55: Elementos que forman la Interrogación remota del sistema diseñado .....	81
Figura 56: Placa Arduino UNO con nombramiento de sus componentes más destacados .....	82
Figura 57: Monitor de puerto serie de Arduino .....	84
Figura 58: Logo DIGI International .....	86
Figura 59: Tipos de antena en módulos Xbee .....	87
Figura 60: Logo del programa XCTU de DIGI International .....	87
Figura 61: Placa Xbee Shield .....	88
Figura 62: Placa Arduino UNO sin su microcontrolador ATMEGA328 .....	89
Figura 63: Pantalla principal de XCTU con la opción de seleccionar el puerto USB deseado .....	90
Figura 64: Configuración del módulo Xbee receptor .....	92
Figura 65: Configuración del módulo Xbee emisor .....	92
Figura 66: Diagrama de Bloques de un programa sencillo diseñado con LabVIEW .....	94
Figura 67: Panel Frontal de un programa sencillo diseñado con LabVIEW .....	94
Figura 68: Diagrama de flujo del funcionamiento del programa LabVIEW diseñado .....	95
Figura 69: Placa Xbee Explorer .....	97
Figura 70: Explorador de proyectos del programa LabVIEW diseñado .....	98
Figura 71: Estados de la Alarma 1 (izquierda) y 2 (derecha) del programa LabVIEW .....	99
Figura 72: Figura completa del diagrama de bloques del programa LabVIEW diseñado .....	100
Figura 73: Configuración para la inicialización del puerto serie en el programa LabVIEW .....	101
Figura 74: Lectura de datos del puerto serie y de transformación .....	102

Figura 75: Figura del icono del subVI “Nuevo Cluster” usado en el programa LabVIEW .....	102
Figura 76: Panel de Control (izquierda) y Diagrama de Bloques (derecha) del subVI “NuevoCluster” .....	103
Figura 77: Caso “Decidir 0” de la estructura de casos del programa LabVIEW diseñado .....	104
Figura 78: Icono del subVI “Comparar” usado en el programa LabVIEW .....	104
Figura 79: Panel de Control (izquierda) y Diagrama de Bloques (derecha) del subVI “Comparar” .....	105
Figura 80: Caso “Decidir 1” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	105
Figura 81: Caso “Decidir 2” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	106
Figura 82: Caso “Decidir 3” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	106
Figura 83: Caso “Decidir 4” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	107
Figura 84: Caso “Decidir 5” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	107
Figura 85: Caso “Decidir 6” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	108
Figura 86: Caso “Decidir 7” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	108
Figura 87: Caso “Decidir 8” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	109
Figura 88: Caso “Decidir 9” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	109
Figura 89: Caso “Decidir 10” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	110
Figura 90: Caso “False” del caso “Negro” de la estructura de casos del programa LabVIEW ..	110
Figura 91: Caso “True” del caso “Negro” de la estructura de casos del programa LabVIEW ...	111
Figura 92: Caso “3” del caso “RPM” de la estructura de casos del programa LabVIEW .....	111
Figura 93: Caso “0”, “1” y “2” del caso “RPM” de la estructura de casos de LabVIEW .....	112
Figura 94: Icono del subVI “Alarmas” usado en el programa LabVIEW .....	112
Figura 95: Panel de Control (izquierda) y Diagrama de Bloques (derecha) del subVI “Alarmas” .....	113
Figura 96: Caso “Print” de la estructura de casos en el programa LabVIEW .....	113
Figura 97: Funciones de Abrir/Cerrar ficheros de texto en LabVIEW .....	113
Figura 98: Datos guardados en fichero .txt durante sesión de pruebas en el laboratorio .....	114
Figura 99: Caso “Fin” de la estructura de casos en el programa LabVIEW .....	114
Figura 100: Casos en los que se para el programa (izquierda) y unión de errores en el programa LabVIEW .....	114
Figura 101: Consola XCTU que muestra datos enviados/recibidos por ambos módulos Xbee.	115
Figura 102: Comparación de la señal del osciloscopio (izquierda) y señal en LabVIEW (derecha) para una velocidad de rotación de 23 rpm .....	116
Figura 103: Comparación de la señal del osciloscopio (izquierda) y señal en LabVIEW (derecha) para una velocidad de rotación de 17 rpm .....	116
Figura 104: Comparación de la señal del osciloscopio (izquierda) y señal en LabVIEW (derecha) para una velocidad de rotación de 10 rpm .....	117
Figura 105: Comparación de la señal del osciloscopio simulando movimiento de 5 rpm .....	117
Figura 106: Gráfica de LabVIEW para una velocidad de rotación de 5 rpm generada con el rodamiento.....	118
Figura 107: Datos del ángulo de paso obtenidos durante una sesión de laboratorio .....	119

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Variación de $I_{LED}$ según $R_E$ obtenida con Multisim .....	55
Gráfica 2: Variación de $I_{LED}$ según $R_E$ obtenida empíricamente.....	56
Gráfica 3: Comparación de la variación de $I_{LED}$ de los datos simulados y los empíricos .....	57
Gráfica 4: Valores de potencia óptica emitida del LED obtenidos con un medidor de potencia óptica .....	59
Gráfica 5: $V_o'$ según la distancia a un espejo .....	72
Gráfica 6: $V_o'$ según la distancia a un espejo con POF peladas .....	73
Gráfica 7: Comparación de $V_o'$ según la distancia a un espejo con POF peladas y sin pelar.....	73
Gráfica 8: Comparación de $V_o'$ según la distancia de reflexión a la plantilla con cuatro tonalidades de gris .....	75



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: $I_{PD}$ según las posibles pérdidas presentes en el camino del haz de luz .....	62
Tabla 2: $R_F$ según las pérdidas estimadas en el camino del haz de luz .....	63
Tabla 3: Resultados de $V_o$ según $R_F$ .....	64
Tabla 4: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 1mm.....	75
Tabla 5: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 2mm.....	76
Tabla 6: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 3mm.....	76
Tabla 7: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 4mm.....	77
Tabla 8: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 5mm.....	77
Tabla 9: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 6mm.....	78
Tabla 10: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 10mm.....	78
Tabla 11: Resultados de $V_o'$ tras la reflexión en distintos colores del codificador óptico.....	79
Tabla 12: Cálculo del umbral para cada caso de la estructura de casos del programa LabVIEW.....	96

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El presente documento técnico presenta el proyecto de final de Grado en Ingeniería Industrial y Automática titulado “Diseño y Desarrollo de un Encoder Óptico con interrogación remota para la medida de la velocidad de giro y ángulo de paso en aerogeneradores” realizado en el departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid bajo la supervisión del Prof. David Sánchez Montero.

El sistema propuesto consta de un sensor de fibra óptica (FOS, “Fiber Optic Sensor”), que opera por reflexión de la luz sobre una superficie reflectora, que permite emular el comportamiento de un giróscopo óptico y a su vez medir la velocidad angular del objeto al que se une. El proyecto además cuenta con un sistema de comunicación inalámbrica que usa el protocolo de comunicación ZigBee. En el presente documento, hemos enfocado el proyecto a los aerogeneradores, que pertenecen a un campo que está en auge por el incremento del uso de energías renovables. El sistema diseñado es capaz de medir los parámetros de velocidad de rotación de las aspas (velocidad de giro) de un aerogenerador y el ángulo de paso de las mismas mediante un sensor óptico. El presente proyecto pretende proporcionar una solución de sensado de bajo coste con el objetivo de monitorizar y controlar la velocidad de giro para evitar que ésta llegue a velocidades muy altas, poniendo así en peligro la integridad de la turbina. Adicionalmente, a una determinada velocidad de rotación, este tipo de instalaciones genera su potencia nominal, por lo que nos interesa mantener la turbina girando a esa velocidad. Esto se puede controlar mediante el ángulo de paso de las aspas, siendo capaz el sistema desarrollado de monitorizar de manera simultánea dicho parámetro. Cabría destacar que el alcance del proyecto se centra en un diseño correcto del sistema de sensado (de instrumentación) propuesto y no en la mecánica de fluidos que define el comportamiento de una turbina eólica.

El sensor de fibra óptica diseñado, que medirá estos dos parámetros, está formado por un driver emisor, un codificador y un driver receptor. El driver emisor se compone de un LED con conector de fibra óptica de plástico (POF) y su correspondiente etapa de acondicionamiento. El empleo de luz como elemento de sensado tiene la ventaja fundamental de que las señales ópticas involucradas son inmunes frente a interferencias electromagnéticas, siendo una ventaja sustancial esta característica para la aplicación propuesta. La singularidad de este proyecto recae también en el uso de la fibra óptica de plástico. A diferencia de la fibra de vidrio, este tipo de fibras son más económicas y sencillas de utilizar. Al estar fabricadas con polímeros, son mucho más dúctiles y flexibles, siendo menos rígidas que las fibras ópticas de vidrio, lo cual les da mucha versatilidad para distintas aplicaciones. De igual modo, los componentes, al tener

conectores sencillos, también son muy económicos lo que aporta a nuestro sistema, gran capacidad de competitividad de mercado. La luz que atraviesa la fibra óptica será reflejada sobre un codificador implementado sobre una superficie reflectora que gira solidario al aerogenerador (encoder óptico). Con el apropiado diseño de dicho elemento seremos capaces de convertir la información de la velocidad angular y el ángulo de paso en señales eléctricas medibles. Gracias al uso de franjas negras que reflejan poca luz, seremos capaces de detectar variaciones periódicas en la potencia óptica reflejada en recepción y calcular, así, la velocidad de rotación. Por otro lado, gracias a una escala de grises, podemos hacer que el sistema se comporte y emule el comportamiento de un giróscopo óptico. Si el objeto en el que está implementado el encoder se mueve, la luz reflejará en una tonalidad de gris diferente y la potencia óptica recibida (salida del sensor) será distinta en cada caso. Así podemos establecer una relación entre la información proporcionada por el sensor y la tonalidad de gris y, por extensión, los grados de inclinación del objeto. Esto último requiere una calibración que relacione al ángulo de inclinación que queremos medir con cada tonalidad de gris del encoder. El driver receptor, por otro lado, está formado por un fotodetector con conector de fibra óptica de plástico y su correspondiente etapa de acondicionamiento. La luz reflejada será capturada por el extremo de su fibra y nos dará un nivel de tensión como dato final, proporcional a la potencia óptica recibida en reflexión. La figura 1 nos muestra las partes de las que se compone el sensor óptico diseñado de manera visual y resume todo lo explicado anteriormente.

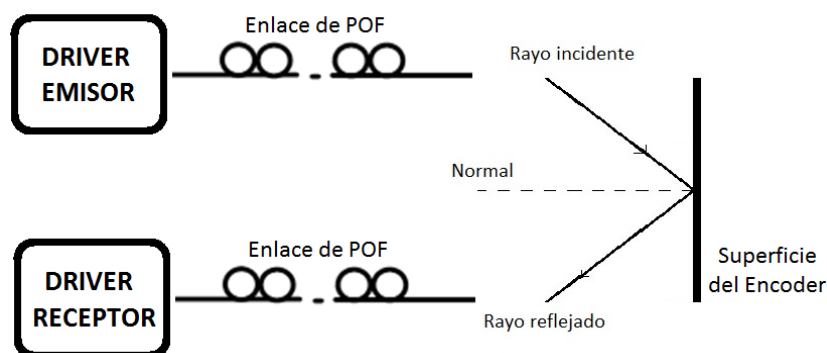


Figura 1: Esquema del sensor de fibra óptica diseñado

La tensión dada por el driver receptor será leída por una placa Arduino UNO que actuará como nodo sensor y posteriormente será enviada inalámbricamente hacia otro nodo que actuará como nodo central usando el protocolo de comunicación de radiofrecuencia conocida como ZigBee. Es un protocolo diseñado expresamente para lugares hostiles con altas interferencias electromagnéticas como es el caso de la cabeza de un aerogenerador. Adicionalmente, se evita diseñar un sistema invasor cableado que mande la información a un ordenador alejado de la turbina. Para poder establecer una comunicación punto a punto, contamos con un módulo emisor situado cerca del sensor óptico diseñado, nodo sensor, y un módulo receptor que se encuentra conectado al PC, nodo central, emulando la localización remota de una oficina o central de control. De esta manera será posible garantizar la interrogación remota de los diferentes parámetros objeto de interés en el presente proyecto. Cada módulo consta de una placa Arduino UNO y conectado a él un módulo Xbee que nos permite enviar datos por

radiofrecuencia usando el protocolo de comunicación ZigBee. Adicionalmente, el módulo receptor está conectado al PC, el cual consta de una interfaz gráfica sencilla de utilizar por un operario mediante el software de desarrollo de sistemas de National Instruments conocido como LabVIEW. La figura 2 nos muestra un esquema del funcionamiento de la interrogación remota que acabamos de explicar.



Figura 2: Esquema de funcionamiento de la interrogación remota del sistema.

El sistema diseñado deberá cumplir ciertas especificaciones para que se pueda considerar como una buena solución para el problema. Primero, para que el sistema sea un producto exitoso en el mercado, deberemos reducir los costes para que pueda tener un precio competente. Esto se puede conseguir mediante una correcta elección de componentes que satisfagan las especificaciones, pero que, al mismo tiempo, no encarezcan el producto. También se pueden reducir costes con el consumo de energía, el cual debe de ser reducido y duradero. Una turbina que no esté en funcionamiento provoca grandes pérdidas económicas a la empresa en cuestión por lo que la instalación inicial deberá ser sencilla para evitar largos periodos de inactividad. Siguiendo la línea de razonamiento, habrá que evitar mantenimientos periódicos por averías o reemplazo de baterías. Segundo, en la góndola de un aerogenerador existen numerosas perturbaciones mecánicas dadas por vibraciones y el propio movimiento de las aspas. Adicionalmente, nuestro sistema va a trabajar en las cercanías de otros dispositivos de control que pueden afectarse mutuamente en forma de interferencias electromagnéticas. El sistema, por tanto, deberá ser robusto para evitar averías y para que los datos no se vean afectados por estas interferencias. En tercer lugar diremos que la solución propuesta deberá ser no invasora, ya que si el sistema tiene contacto directo con la turbina, su principio de funcionamiento podría verse afectado de algún modo. Por último debemos tener en cuenta que toda la información recopilada va a ser leída por un operario. Con esto nos surge otro punto que satisfacer, que es el de implementar una interfaz gráfica sencilla para que a simple vista se pueda saber si se han alcanzado valores críticos en la turbina.

## 1.2. CONTENIDOS

A lo largo del documento se explicará el diseño, desarrollo e implementación de las distintas partes que componen la solución o sistema de instrumentación propuesto. Primero se dará una visión teórica y conceptual de las distintas tecnologías que aparecen a lo largo del proyecto y después se explicará la parte experimental y los resultados obtenidos.

El capítulo 2, titulado “Aerogeneradores”, expone una descripción de los aerogeneradores y explica los parámetros críticos que definen su comportamiento. Adicionalmente se explican los sistemas de control distintos que existen implementados en la actualidad.

El capítulo 3, titulado “Sensores Ópticos”, está dividido en dos partes. Primero, se hace un estudio de la fibra óptica de plástico (POF) y se destacan sus ventajas frente a la fibra óptica de vidrio. Como veremos, la POF tiene otros usos además de su uso en telecomunicaciones, en este caso como elemento para sensado. En la segunda parte del capítulo veremos los distintos sensores basados en POF que existen y cómo pueden ser clasificados. En nuestro caso, los dividiremos en cuatro grupos: según su principio de transducción, según su distribución espacial, según la variable física a medir y, por último, según las características del haz de luz que son capaces de modular.

En el Capítulo 4, titulado “Comunicaciones Inalámbricas”, se hace un estudio de las distintas comunicaciones inalámbricas que podrían usarse en el proyecto y se escoge la más acertada que, en nuestro caso, es la tecnología ZigBee.

Antes de comenzar con la parte experimental del proyecto, en el capítulo 5 se dará una visión clara del conjunto del sistema sensor objetivo del proyecto. Se describe el sistema diseñado, su funcionamiento y sus características.

En el capítulo 6, titulado “Diseño y desarrollo del sensor óptico”, se aborda el diseño y desarrollo tanto del driver emisor como el driver receptor del sensor óptico diseñado. Ambos comienzan con una justificación de los componentes usados, y continúan con la explicación del circuito de acondicionamiento usado.

En el capítulo 7, titulado “Diseño y desarrollo del Encoder Óptico”, se aborda el diseño y desarrollo del encoder óptico y se explican los resultados obtenidos. Estos resultados son muy importantes ya que serán usados para diseñar un programa que funcione acorde a las especificaciones requeridas para un buen funcionamiento del sistema.

El capítulo 8, titulado “Interrogación remota”, está dividida en tres partes. Primero, se hace un estudio de las características de Arduino y se dan los motivos por los que se ha usado en el proyecto. A continuación se explica detalladamente el código diseñado. En la segunda parte del capítulo se explica que existen unos módulos, llamados módulos Xbee, que usan el protocolo de comunicación inalámbrica ZigBee. Tras esta explicación, se muestran los pasos para programarlos y que establezcan una comunicación punto a punto. Por último, se hace un estudio

de una herramienta de instrumentación virtual de National Instruments conocida como LabVIEW. Tras esto, se explica detalladamente el programa diseñado.

El capítulo 9 hace referencia al presupuesto previsto del proyecto.

A lo largo del capítulo 10 se muestra el diseño final obtenido, los resultados y las conclusiones una vez finalizado el proyecto. También mencionamos las mejoras que se podrían hacer al proyecto y posibles aplicaciones en otros campos.

El capítulo 11 hace referencia a la bibliografía del proyecto.

En los anexos se incluye las hojas de características de los componentes principales usados en el diseño y desarrollo del sistema.

- IF-E97
- IF-D91
- PM20A
- TCRT5000
- Módulos Xbee
- ATMEGA328P

## CAPÍTULO 2: AEROGENERADORES

Hoy en día es irrefutable que el cambio climático es una amenaza creciente y afecta a todo el planeta por igual. En los últimos años los impactos asociados se han acentuado provocando cambios irreparables en los ecosistemas de la Tierra. La temperatura de la superficie terrestre ha experimentado el mayor y el más rápido aumento de los últimos 10.000 años. La temperatura global ha incrementado en 0,74 °C en el último siglo y, concretamente en España, ha aumentado en magnitud superior a la media global; la temperatura ha aumentado en 1,5 °C solamente en las tres últimas décadas. Además de la temperatura, el nivel del mar también ha experimentado un crecimiento vertiginoso y se prevé una subida adicional de alrededor de los 60 cm en los próximos cien años [GPeace].

Por todo esto, se está produciendo una revolución energética en la que el uso de energías renovables ha ido aumentando, aunque la principal fuente de energía en todo el planeta sigue siendo la basada en combustibles fósiles como el petróleo. Este tipo de generación de energía es especialmente favorable para un país como España en el que el clima es enormemente variado y los recursos renovables están distribuidos por todo el territorio peninsular. Toda la demanda energética futura se podría abastecer en su totalidad con energías renovables, siendo capaces de generar más de 56 veces la demanda eléctrica para el año 2.050, según un estudio realizado por Greenpeace España junto con el Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas en el año 2010 llamado “*Renovables 2050: El potencial de las energías renovables en la España Peninsular*” [R2050].

En España, el potencial de la energía eólica es muy superior a los actuales objetivos de planificación, por lo que se prevé un aumento significativo en el uso de ésta tecnología. En el presente capítulo nos centraremos en realizar un estudio de los aerogeneradores utilizados para generar grandes cantidades de electricidad. La figura 3 representa el aerogenerador más avanzado del mercado actual fabricado por la empresa española líder mundial en energías renovables e infraestructuras, Acciona [Acciona].



Figura 3: Aerogenerador AW3000 [Acciona].

Las palas están unidas al aerogenerador a través del buje, que a su vez está acoplado al eje lento y gira solidario a éste. Para producir electricidad es necesario aumentar la velocidad a la que gira el eje lento mediante la multiplicadora, que la aumenta en el orden de 100 veces y la transfiere al llamado eje rápido. La energía cinética de éste, pasará al generador que la transforma en energía eléctrica. El eje está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia que se actúa cuando falla el freno aerodinámico, o si lo acciona el centro de control. Todo esto va montado en la cabeza de la turbina, conocida como góndola [Acciona]. Todo esto se puede ver reflejado en la figura 4, donde se ven todas las partes que componen el aerogenerador.

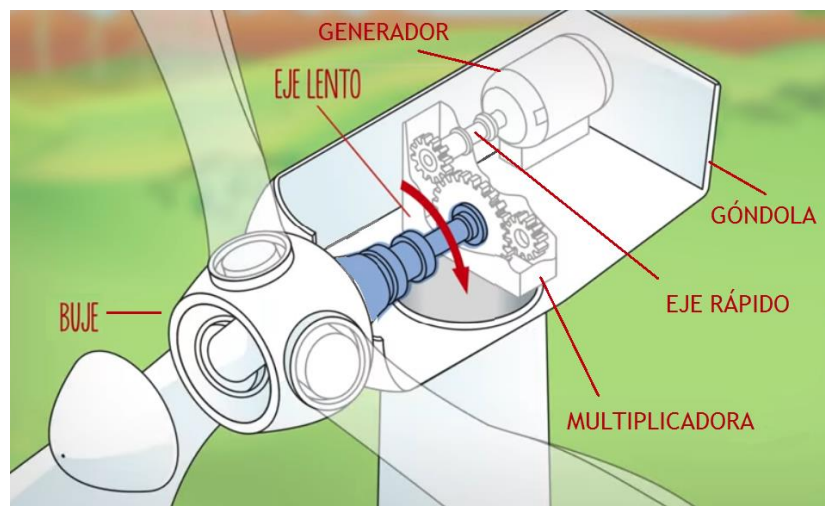


Figura 4: Partes de un aerogenerador [Acciona].

Cada aerogenerador dispone de una veleta en su parte superior que le indica la dirección del viento. Esto le permite girar sobre la torre y disponerse de tal modo que la incidencia del viento sea máxima en las palas. Éstas giran sobre su eje a una velocidad de entre 13 y 20 revoluciones



por minuto, dependiendo de la velocidad del viento. Gracias al diseño de las aspas, éstas son capaces de captar la máxima energía de los vientos, siendo la velocidad mínima necesaria de 3 m/s, llamada velocidad de corte, y corresponde a la velocidad a la cual las aspas comienzan a girar. Llegados a este punto, se empieza a producir energía eléctrica y, a medida que la velocidad del viento aumenta, la potencia generada es mayor, siguiendo la llamada curva de potencia. Esta curva, representada en la figura 5, nos proporciona una idea de cuál será la potencia eléctrica generada en función de la velocidad del viento para una turbina de 600 kW [DWIA].

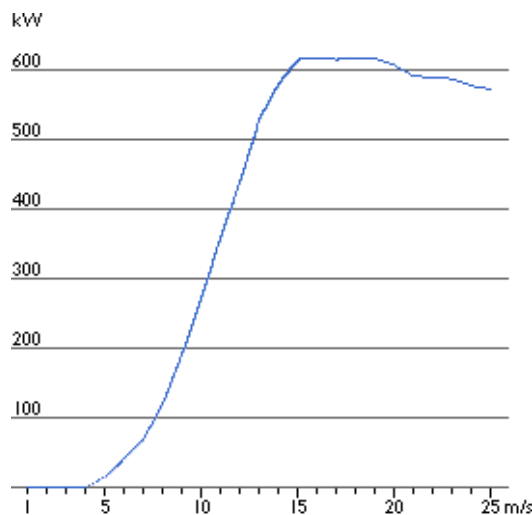


Figura 5: Curva de potencia de un aerogenerador de 600 kW [DWIA].

Estas curvas se usan para tener una idea general de la relación de la potencia generada en aerogeneradores en función de la velocidad del viento, considerándose aceptable un error en la estimación en torno al 10%. Esto se debe a que en la práctica no se puede medir exactamente la columna de viento que pasa a través del rotor del aerogenerador por lo que se usan promedios [DWIA]. Como podemos ver, existe una velocidad nominal del viento que hace que el rotor gire para proporcionar la potencia nominal de la turbina. Es en éste punto en el que, aunque aumente la velocidad del viento, no interesa que la velocidad de giro aumente ya que la potencia final generada será menor que la nominal. En este caso, hay que actuar sobre las palas para regular la velocidad de giro. En el caso extremo en el que la velocidad del viento continuase aumentando, con corrientes por encima de los 25 m/s, el aerogenerador debe frenarse por motivos de seguridad. A estas velocidades, la integridad del aerogenerador se podría ver comprometida por la presencia de turbulencias. Existen varios métodos para controlar la generación de potencia de los aerogeneradores:

- Regulación por cambio del ángulo de paso, en inglés llamado "pitch controlled".
- Regulación por pérdida aerodinámica, en inglés llamado "stall controlled".
- Regulación activa por pérdida aerodinámica.
- Otros métodos de control de la potencia del rotor, como el uso de alerones para modificar la geometría de las aspas.

De todos los mecanismos de control mencionados, los más usados son los dos primeros. En el primer caso, en un aerogenerador de regulación por cambio del ángulo de paso, el controlador electrónico comprueba varias veces por segundo la potencia generada y si esta no es la esperada, envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso de las aspas de la turbina. El proceso de diseño de estos aerogeneradores es muy compleja ya que asegura que las palas giren exactamente en el ángulo deseado alrededor de su eje longitudinal para mantener un ángulo óptimo que proporcione el máximo rendimiento para cada velocidad del viento. Adicionalmente, si se llegan a velocidades de viento muy elevadas se puede parar la máquina haciendo girar el ángulo de paso de las palas de la hélice, de tal manera que éstas presenten la mínima oposición al viento. En cambio, en el segundo caso, en aerogeneradores de regulación por pérdida aerodinámica, las palas están unidas en un ángulo fijo. El perfil de la pala se diseña aerodinámicamente de tal modo que, cuando la velocidad del viento es muy alta, se crean turbulencias perdiendo así sustentación. La principal desventaja de este diseño es la presencia de turbulencias que afecta a toda la estructura y provoca un gran desgaste **[DWIA]**.

Podemos decir que, existen numerosos parámetros críticos en un aerogenerador que tienen que ser controlados. Entre otros, en el presente documento técnico, nos centraremos en la velocidad de rotación de las palas, y el ángulo de paso de las mismas. Consideramos, que estos dos factores, son de vital importancia para un aerogenerador de regulación por cambio del ángulo de paso, que es el modelo de aerogenerador que más parámetros necesita controlar. Conociendo la velocidad de las aspas de la turbina, podemos saber si la potencia generada es la potencia nominal esperada o si se ha llegado a una velocidad superior a la permitida que puede dañar el aerogenerador. Adicionalmente, conociendo el ángulo de paso de las aspas, podemos controlar la velocidad de giro de las palas ya que se consigue variar la fuerza aerodinámica que actúa sobre ésta y conseguir una velocidad de rotación fija con distintas condiciones de viento. Mediante el sistema de sensado propuesto en este proyecto será posible monitorizar y determinar ambos parámetros de manera simultánea y así poder actuar de manera conveniente sobre la operativa del aerogenerador.

## CAPÍTULO 3: SENSORES ÓPTICOS

### 3.1. FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO (POF)

En el campo de las telecomunicaciones, para enviar información de un punto a otro, las frecuencias de trabajo han ido aumentando con el tiempo. En los sistemas electrónicos, en la mayoría de los casos, la información se envía usando modulación. La modulación consiste en la modificación de alguna propiedad de una onda sinusoidal, llamada onda portadora, superponiendo una señal que contiene la información que necesitamos enviar, llamada onda moduladora. Las propiedades que podemos modificar son la amplitud, frecuencia o fase. La señal resultante es la conocida como la señal portadora. Si aumentamos la frecuencia de la portadora, se aumentará la cantidad de información transmitida en un mismo intervalo de tiempo, por lo que con los años, el rango de funcionamiento, ha ido aumentando para poder enviar más información. Debido al uso de altas frecuencias, se está empleando el rango de frecuencias correspondiente a la luz visible para transmitir información, utilizando fibra óptica (FO) como medio de transporte [ZubiaArrue]. En la actualidad, la fibra óptica es uno de los principales medios de transmisión de datos y se prevé un crecimiento debido al gran desarrollo de las redes ópticas de banda ancha. La fibra óptica de plástico, en inglés “Plastic Optic Fiber” (POF), y la fibra óptica de vidrio o sílice, siguen los mismos principios físicos, pero cabe destacar que existen ventajas que nos harán decantarnos por el uso de POF en nuestro sistema.

La fibra óptica presenta muchas ventajas en comparación con otros tipos de medios de transmisión. Tiene gran ancho de banda y mayor velocidad de transmisión, es muy robusta ante perturbaciones electromagnéticas por lo que proporcionan gran fiabilidad en la transmisión, poseen una baja atenuación de la señal lo que permite comunicaciones a larga distancia con una penalización razonable en potencia de la señal y, al emplear luz para enviar información en lugar de señales eléctricas, no existe riesgo de cortocircuito, daño eléctrico o de explosión en entornos hostiles que incluyan materiales inflamables. Físicamente tienen menor diámetro y peso respecto de un cable coaxial, por ejemplo, y son más duraderas que los medios de comunicación eléctricos. De manera particular, la POF está compuesta exclusivamente por polímeros por lo que son mucho más dúctiles y flexibles y, por lo tanto, menos rígidas que las fibras ópticas de vidrio, lo cual les da mucha versatilidad para distintas aplicaciones. Debido al mayor tamaño del diámetro de núcleo de la POF esto hace que la conexión e instalación de la misma sea más sencilla respecto de la de vidrio, reduciendo los costes de su instalación. De igual modo, los componentes, al tener conectores sencillos, también son muy económicos lo que aporta al sistema gran capacidad de competitividad de mercado. Durante décadas, ésta ha sido eclipsada por la de vidrio por su atenuación ligeramente inferior y la alta demanda en aplicaciones comerciales de telecomunicaciones principalmente, pero en los últimos años, gracias a los

avances en la POF, su uso se ha extendido, principalmente en aplicaciones y redes ópticas de corto alcance (LAN) y dentro del hogar.

La sección transversal de la fibra es circular, y como podemos ver en la figura 6, está compuesta por tres capas a modo de círculos concéntricos. En el centro se encuentra el núcleo por donde se guía la luz dentro de la fibra óptica, siguiendo el principio de reflexión total interna (TIR, Total Internal Reflection). El núcleo en todos estos tipos de fibras POF tiene un gran diámetro lo que hace que se facilite su manipulación respecto de otros tipos de fibras ópticas comerciales existentes. La reflexión interna total es un fenómeno que se produce cuando el rayo de luz incide en un medio de índice de refracción menor (el revestimiento, cladding) que el índice de refracción del medio en el que se encuentra y por donde se propaga el rayo de luz (el núcleo, core). Cuando el ángulo de incidencia del rayo de luz en la interfaz de ambos medios es mayor que un determinado ángulo crítico, la luz se refleja completamente porque no es capaz de atravesar la frontera entre núcleo y cubierta, propagándose así a lo largo de la fibra a lo largo del núcleo de la misma **[PFC-Guimar]**. Como podemos ver en la figura 6, seguidamente del núcleo se encuentra el revestimiento, en inglés “cladding”, fabricada con un material de índice de refracción inferior al núcleo para garantizar la condición TIR. Por último una cubierta que actúa como la capa protectora, conocida en inglés como “jacket” **[LFW]**, que confiere de robustez mecánica al cable de fibra en su conjunto.

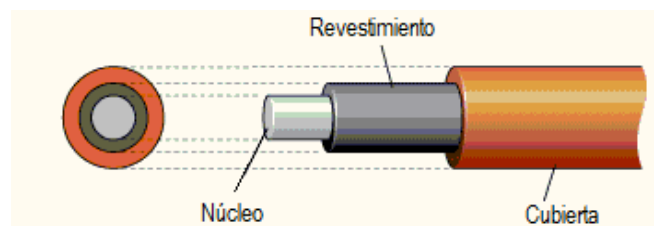


Figura 6: Partes de una POF [LFW].

Según como se propague la luz en el interior de la fibra, podemos dividirlos en monomodo y multimodo. En el primer caso, el haz de luz viaja con unas características o propiedades físicas determinadas resultado de resolver las ecuaciones de Maxwell sobre la propagación de una onda electromagnética en un medio dispersivo. En una fibra monomodo únicamente una única solución a estas ecuaciones es posible, constituyendo un solo modo de propagación de la luz dentro de la fibra. Se suelen usar en el campo de las comunicaciones con alta transferencia de datos y de larga distancia, por su baja atenuación y gran ancho de banda. En contraposición, el reducido tamaño de su núcleo requiere un conexionado más preciso para poder acoplar luz a la fibra. Por otro lado, en las fibras multimodo coexisten varios modos (condiciones) de propagación de la luz dentro de la misma y, generalmente, las POF se agrupan dentro de esta categoría. Este tipo de fibras se utilizan para comunicaciones de corto alcance, como en entornos industriales o constituyendo las redes ópticas de fibra dentro del hogar, así como en sensores ópticos. Dentro de esta categoría, debemos saber que existen distintos perfiles de índice de refracción: de salto de índice (SI) e índice gradual (GI). Antes de entrar en una descripción más detallada, la figura 7 nos da una idea clara de los tipos de fibra óptica según la propagación del haz de luz **[IFO] [FOA] [PFC-Pérez]**.

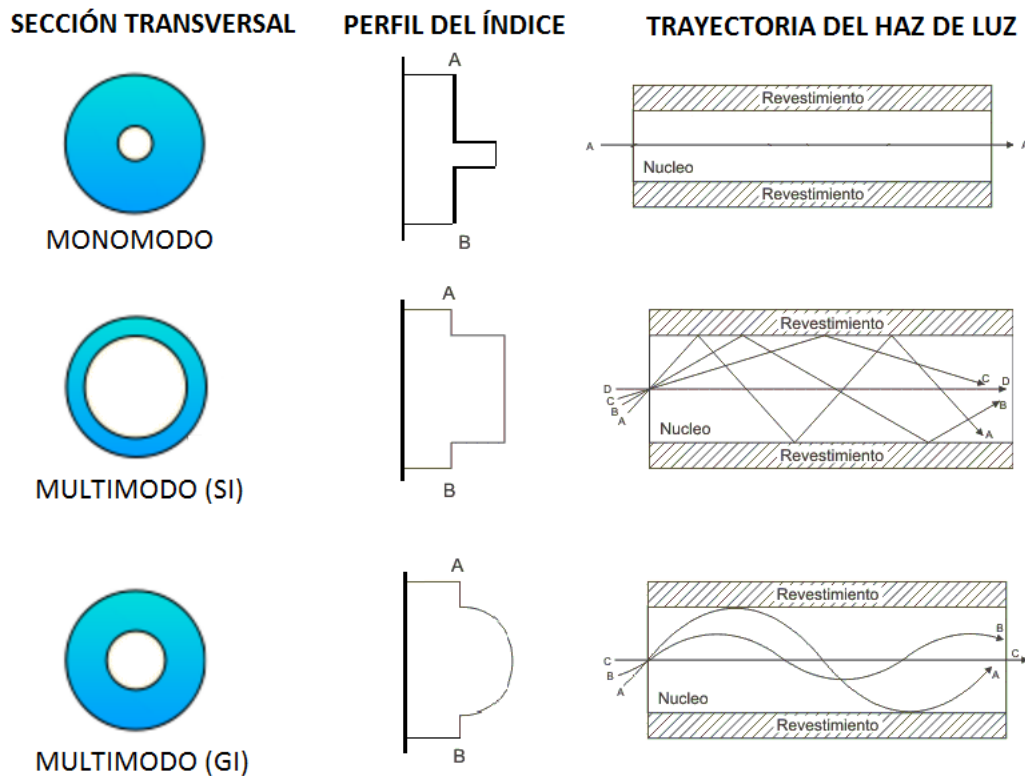


Figura 7: Perfiles de índice de refracción en fibra óptica

En las fibras ópticas de salto de índice, el núcleo está fabricado con un tipo de material e índice de refracción constante en toda la sección y el revestimiento con otro material de características ópticas diferentes. En cualquier caso se debe cumplir que el índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento de la fibra satisfaciendo así condición de TIR que hemos explicado antes. A este grupo pertenecen la mayoría de POFs existentes en el mercado. Tienen alta dispersión modal por lo que presenta anchos de banda limitados. Este es el motivo por el que las fibras ópticas multimodo no se usan en el campo de las telecomunicaciones donde la transmisión de datos debe ser a altas tasas de transmisión [FOA] [PFC-Pérez].

Por otro lado, en las fibras ópticas de índice gradual, el índice de refracción no es constante ya que al núcleo de la fibra se le añaden diferentes materiales dopantes. Al dopar el núcleo con otros materiales poliméricos, el índice de refracción resultante en el núcleo, tras el proceso de fabricación de la fibra, decrece en función del radio de la fibra (generalmente de forma parabólica). Esto significa que el índice es máximo en el centro y mínimo cerca del recubrimiento. Hay que tener en cuenta que el proceso de fabricación complejo que requieren hace que el precio de este tipo de fibra sea mayor que para las de salto de índice. El ancho de banda proporcionado por este tipo de fibras es mayor respecto de las anteriores puesto que presentan menor dispersión modal. Esto los hace adecuados para sistemas en los que hay que transmitir gran cantidad de datos igualmente, aunque de alcance limitado respecto de las fibras monomodo de sílice, debido a su elevado coeficiente de atenuación respecto de éstas [FOA] [PFC-Pérez].

Cuando la señal luminosa a la salida es menor que a la entrada, se dice que la señal se ha atenuado. Hay varios factores, como los materiales de los que está fabricada la propia fibra, que caracterizan su comportamiento al transmitir un haz de luz. En capítulos futuros, haremos un estudio de la atenuación según la longitud de onda del emisor usado, para determinar el espectro de luz más acertado con el que operar. Como cabe esperar, la potencia óptica en una fibra de plástico (POF) disminuye según la distancia de acuerdo a la ecuación:

$$P(z) = P(0) \cdot 10^{-\alpha \frac{z}{10}} \quad (3.1)$$

donde:

la variable  $z$  es la distancia y  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación de la fibra (generalmente expresado en dB/km ó dB/m). En este caso,  $P(z)$  es la potencia óptica a la salida de una fibra óptica de plástico de distancia  $z$  y, en cambio,  $P(0)$  es la potencia óptica en el comienzo de la fibra, es decir, a una distancia nula o punto de origen de la inyección de luz en fibra.

El coeficiente  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación de la fibra y responde a la ecuación 3.2:

$$\alpha = -\frac{1}{z} \cdot 10 \cdot \log\left(\frac{P(z)}{P(0)}\right) [\text{dB/km}] \quad (3.2)$$

La curva de atenuación espectral de la fibra óptica de plástico, representada en la figura 8, nos muestra la atenuación que se produce en función de decibelios por kilómetro (dB/Km), según la longitud de onda con la que estemos trabajando. Con ésta, podemos analizar las pérdidas de potencia que se podrían dar en la POF según la longitud de onda de operación [ZubiaArrue].

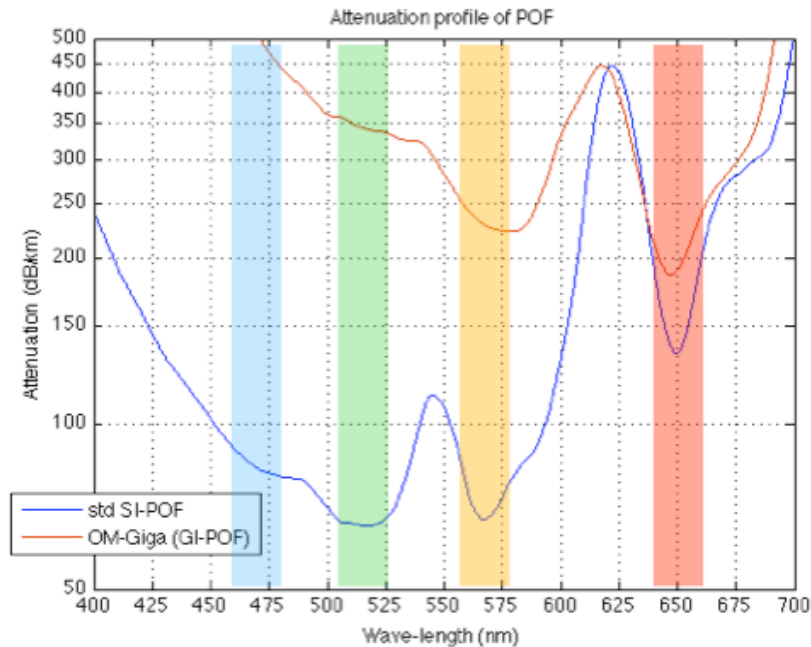


Figura 8: Perfil de atenuación de una POF [KDPOF].

En la gráfica podemos ver dos líneas que corresponden a los dos tipos de fibra óptica de plástico que acabamos de ver. La curva azul, llamada “std SI-POF”, corresponde a POF de salto de índice

y curva roja, llamada “GI-POF”, a la de índice gradual. El rendimiento óptimo se encuentra en el espectro visible de la luz, por lo que con este tipo de fibras no es óptimo trabajar con longitudes de onda en el rango ultravioleta, por debajo de los 400nm, y el rango de infrarrojo, por encima de los 750nm. Las pérdidas de potencia luminosa serían demasiado grandes por lo que no tendría sentido trabajar con este tipo de ondas lumínicas. La gráfica representada en la figura 8 es muy explicativo, y a simple vista vemos las pérdidas de la fibra según el color de la luz con el que estemos trabajando.

En el caso de la POF de salto de índice, existen varios puntos de inflexión (mínimos locales) que indican a qué longitud de onda sería óptimo trabajar. Para una longitud de onda cerca de los 475nm, que corresponde al color azul, las pérdidas están alrededor de los 80 dB/km (0,08 dB/m). Para una longitud de onda cerca de los 525nm, que corresponde al color verde, las pérdidas están por debajo de los 70 dB/km (0,070 dB/m). Para una longitud de onda cerca de los 575nm, que corresponde al color amarillo, las pérdidas están ligeramente por encima de las pérdidas características del espectro verde. Para el caso de la fibra óptica de plástico de índice gradual, las pérdidas son mucho mayores que para el caso anterior pero existen dos puntos de inflexión que nos indican dos longitudes de onda distintas a las que podríamos trabajar. Para una longitud de onda cerca de los 575nm, que corresponde al color amarillo, las pérdidas rondan los 225 dB/km (0,225 dB/m). Ambos tipos de fibras tienen un punto común que coincide con una longitud de onda de 650nm, que corresponde al color rojo donde las pérdidas rondan los 130 dB/km (0,13 dB/m) para el caso de la fibra de salto de índice, siendo para el caso de índice gradual ligeramente superiores.

El uso de la fibra óptica se ha centrado en sistemas de telecomunicaciones pero su uso también se puede extender a sensores basados en fibra óptica. Estos sensores son sistemas de transmisión por fibra óptica que se componen por un emisor, la propia fibra, y un receptor. Existe una gran variedad de emisores ópticos que se encargan de transformar una señal eléctrica en una luminosa. De mismo modo, existe una amplia gama de detectores que realizan el proceso contrario; convierten una señal luminosa en una señal eléctrica que somos capaces de medir. Las razones principales por las cuales su uso se está extendiendo cada vez más es debido a sus pequeñas dimensiones y el hecho de trabajar con luz en lugar de corriente eléctrica que reduce el riesgo de ignición en ambientes hostiles.. Concretando a nuestro caso de estudio, al estar trabajando con señales lumínicas y no eléctricas, se reduce el riesgo de ignición en lugar hostil como puede ser la cabeza de un aerogenerador, en el que están presentes numerosas interferencias electromagnéticas provenientes del resto de sistemas electrónicos preexistentes. En estos sensores, la modulación se produce durante la transmisión a través de la fibra, en la que el haz de luz puede sufrir cambios por algún parámetro físico del exterior que actúa en ella. Aquí es donde surge la necesidad de clasificar los sensores ópticos basados en fibra óptica que dependen del enfoque que quiera dar el autor. Adicionalmente nos centraremos en los distintos sensores según la componente de la luz que va a ser modificada por la magnitud física exterior. Estos sensores modulan según la longitud de onda, la fase y la potencia óptica (se omite la mención a sensores de tipo polarimétrico o sensibles a la polarización de la luz por no estar extendido su uso con carácter comercial).



### 3.2. SENSORES ÓPTICOS

Durante las últimas décadas, el número de artículos publicados relacionados con la tecnología de sensores nos indican que la investigación de esta tecnología es una de las áreas de mayor crecimiento. En particular, entre los esquemas que actúan como sensores, los sensores de fibra óptica conocidos como FOS, cuyas siglas en inglés significan “Fiber Optic Sensors”, están ganando gran importancia principalmente por el desarrollo y avance de las comunicaciones a través de fibra óptica. En los sensores de tipo óptico, los valores de la magnitud física a medir y la variable de salida dada, siguen una relación definida y repetitiva. Los FOS pueden medir magnitudes físicas que actúan en la fibra, por donde se transporta el haz de luz. La magnitud física externa en cuestión modifica algún parámetro de la luz y el fotodetector a la salida del sistema, transforma la información recibida a una magnitud eléctrica que seamos capaces de medir, en particular corriente eléctrica.

Los sensores ópticos son muy adecuados debido a que proporcionan una alta sensibilidad y una respuesta prácticamente inmediata. Al presentar baja atenuación, se pueden realizar medidas remotas del orden de decenas de kilómetros (basados en fibras ópticas de sílice, fundamentalmente), o bien, medidas distribuidas a lo largo de la misma. Son robustos e inmunes a interferencias electromagnéticas, por lo que se están empleando en ambientes hostiles como puede ser el de una central eléctrica. Su robustez también ayuda a realizar correctas mediciones donde la temperatura ambiente es tan elevada que los sensores tradicionales no funcionan adecuadamente. Al emplear luz para enviar información en lugar de señales eléctricas, no existe riesgo de cortocircuito o daño eléctrico, por lo que se está utilizando en entornos donde la generación de señales eléctricas es peligrosa como pueden ser aviones o tanques de combustible. En el campo de la biomedicina se están usando por su pequeño tamaño y su versatilidad que hace posible que se pueden usar en numerosas aplicaciones complejas. De manera particular, el empleo de sensores ópticos basados en POF es una tecnología en auge en este campo gracias a la biocompatibilidad inherente de los materiales poliméricos que conforman la POF frente a la sílice, vidrio, o conductores metálicos. Al margen del campo de la biomedicina, al tratarse de sensores compactos, ligeros y de tamaño reducido, se facilita su transporte, instalación y mantenimiento. Sin embargo presentan varios inconvenientes como puede ser un coste mayor con respecto a otros sensores basados en tecnologías ya plenamente desarrolladas, y la falta de conocimiento por parte del usuario final de esta tecnología.

Como hemos visto, existen diversidad de instrumentos y técnicas de medida ópticas por lo que hay varias formas de catalogar los dispositivos y dependen exclusivamente de la visión que el autor quiera dar. En nuestro caso, los clasificaremos en cuatro divisiones para darnos cuenta de que hay sensores que se pueden incluir en varios grupos a la vez. Primero estudiaremos los dos tipos de sensores según su principio de transducción: intrínsecos y extrínsecos. Segundo, los que dependen de su distribución espacial, que pueden ser tres: puntuales, cuasi distribuidos y distribuidos. A continuación haremos un estudio de los sensores según la variable física a medir. Esta parte es extremadamente extensa por la cantidad de magnitudes físicas que se podrían medir, por lo que nos centraremos exclusivamente en los más importantes y más usados. En



este caso, hablaremos de los sensores que son capaces de medir efectos mecánicos, electromagnéticos, térmicos, químicos... Por último, veremos los sensores según las características del haz de luz que son capaces de modular. En este grupo también hay más parámetros, pero en el presente documento técnico hablaremos de los que son capaces de modular la fase, longitud de onda y la intensidad óptica que atraviesa la fibra [DavidSM].

### 3.2.1. SEGÚN SU PRINCIPIO DE TRANSDUCCIÓN.

En primer lugar vamos a dividir los sensores ópticos basados en POF en dos grupos según la forma en la que convierten la variable física a una señal de salida que podamos medir. Estos dos grupos son los sensores de transducción intrínseca y extrínseca. En la figura 9, en la figura superior podemos ver un esquemático del principio de funcionamiento de los sensores extrínsecos y en la figura inferior, los sensores intrínsecos.

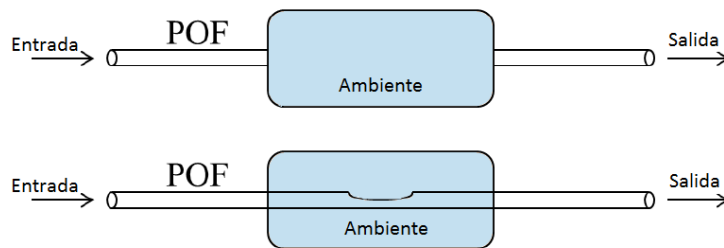


Figura 9: Esquemático de sensores ópticos basados en POF de tipo extrínseco (superior) e intrínseco (inferior) [LuNéJRo].

Los sensores intrínsecos utilizan la propia fibra óptica como elemento detector, modificando alguna característica del haz de luz que recorre su interior. Estos sensores se pueden usar para medir curvaturas en la fibra o fuerzas actuando en ella. Además, a este tipo de sensores pertenecen los que se basan en FBG, cuyas siglas en inglés significan “Fiber Bragg Grating” [LuNéJRo] [Udda]. En ellas, en un segmento pequeño de la fibra óptica, se modifica el índice de refracción del núcleo para que refleje ciertas longitudes de onda y deje pasar otras. Este principio de funcionamiento se puede ver en la siguiente figura, en la que podemos ver la respuesta espectral de la luz a la entrada de la fibra, durante la transmisión y la que es reflejada por los tramos modificados de la fibra [NI-FBG].

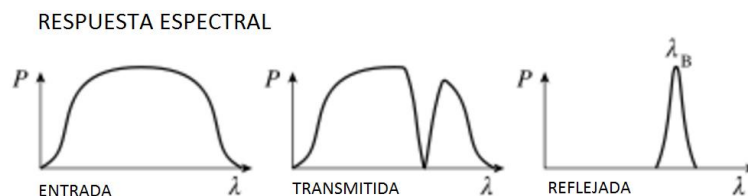


Figura 10: Respuesta espectral de un sensor óptico FBG [wikiFBG].

En los sensores extrínsecos la modulación de la luz se produce fuera de la fibra óptica y ésta se utiliza exclusivamente para transmitir la información a un detector. El haz de luz se puede mandar a un sensor óptico externo el cual se ve afectado por la magnitud física, o bien, existen

sensores que tienen fibras enfrentadas en su extremo y la luz es modulada durante su paso por un ambiente externo [DavidSM]. Dentro de este tipo de sensores se encuentran los que se basan en el principio de reflexión que normalmente se componen de un emisor y un fotodetector, implementados en un mismo componente que hace que su uso en otras aplicaciones sea rápido y sencillo. La luz emitida por el emisor óptico se propaga en el medio físico y se pierde en el espacio si no existe un objeto en su trayectoria. Cuando aparece un objeto, parte del haz de luz rebota sobre él pudiendo llegar a un receptor óptico convenientemente situado, produciendo una señal a la salida del mismo. Cabría destacar que, atendiendo a este principio de funcionamiento, un objeto de color negro no podría ser detectado ya que absorbería toda la luz que incide en él. Dentro de este tipo de sensores podemos agrupar también a los codificadores ópticos, conocidos en inglés como “encoders”. Estos dispositivos tratan de determinar la posición angular o el movimiento de un eje generando pulsos digitales o análogos que puedan ser interpretados por un dispositivo electrónico. Al igual que los dispositivos anteriores, se componen de un emisor óptico y un fotodetector, y, adicionalmente, un disco que gira solidario al movimiento que queremos detectar. Este disco se encuentra “codificado” con unas marcas transparentes y otras opacas que bloquean el paso de la luz emitida por la fuente de luz al fotodetector. Esto produce un “código de pulsos” que será leído por un controlador electrónico y traducirá la información de la señal pulsada a la velocidad o posición real del eje. Según su diseño básico, podemos encontrar los encoders relativos y absolutos. Dentro de los codificadores relativos, la posición angular se determina realizando cuentas incrementales y necesita energía constante para mantener la información de la posición anterior, como referencia, para determinar la actual. Cuando esta energía se pierde, existe una posición estratégica desde donde siempre comenzará la cuenta. Este tipo son ampliamente usados por su bajo coste y su fácil implementación. En cambio los codificadores absolutos nos indican la posición angular en ese instante de tiempo ya que cada posición es única al existir un código único para cada posición. De ese modo, aunque la energía deje de ser suministrada, se sabrá la posición exacta al volver a funcionar. En este tipo, el tamaño del componente es muy pequeño lo que ofrece una integración más simple.

### 3.2.2. SEGÚN SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

En segundo lugar dividiremos los sensores según su distribución espacial en tres grupos: sensores puntuales, sensores cuasi distribuidos y sensores distribuidos. Un sensor puntual sólo detecta en un punto espacial, por lo que cuando se necesita medir en una serie de puntos, éstos se acceden por distintos canales. En cambio, los sensores cuasi distribuidos tienen la capacidad de medir la variable física en puntos discretos del espacio pero situados a lo largo de la misma fibra y así se aumenta el número de puntos de medición para un solo sensor. En esta categoría podemos incluir los que, a lo largo de una fibra óptica, contienen franjas FBG distribuidas que miden cada una la magnitud en ese punto. Por último, los sensores distribuidos pueden medir una variable física a lo largo del espacio y de forma continuada. Cuando pueden determinar la proporción de la variable física y su posición en el espacio, se puede realizar el mapeo espacial

de ésta variable. Para conseguirlo, se puede usar el principio de funcionamiento de los radares, que es medir el tiempo que ha transcurrido desde el lanzamiento del pulso y la recepción de la luz [LuNéJRo] [DavidSM]. Hay sensores distribuidos que usan la retrodispersión de la luz, en inglés “backscattering”, para realizar mediciones ya que, aunque la mayor parte de la luz que recorre la fibra sale por el extremo final, una pequeña parte es reflejada en dirección opuesta por el efecto de la magnitud externa, la cual somos capaces de medir. Este fenómeno físico se puede ver en la siguiente figura.

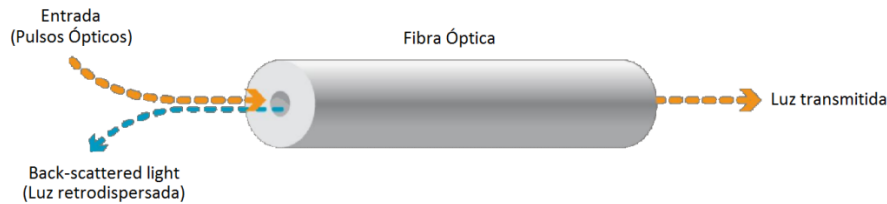


Figura 11: Fenómeno de retrodispersión de la luz en una fibra óptica [ALAVAing].

### 3.2.3. SEGÚN LA VARIABLE FÍSICA MEDIDA

A continuación haremos un estudio de los sensores según la variable física a medir. Esta parte es extremadamente extensa por la cantidad de magnitudes físicas que se podrían medir, por lo que nos centraremos en algunos como los capaces de medir efectos mecánicos, electromagnéticos, térmicos, químicos y radiaciones.

Los sensores mecánicos pueden medir desplazamientos, velocidad, aceleración y rotación entre muchas más magnitudes. Adicionalmente, las fuerzas mecánicas que actúen sobre la fibra óptica pueden modular la luz que atraviesa por ella como fuerzas externas actuando en la misma, presión, dobleces en la fibra, etc... Aparte de los sensores basados en FBG, usados para medir temperatura o desplazamiento longitudinal, encontramos sensores de localización remota. En éstos, la fibra envía una señal luminosa a una ubicación remota, y, los objetos que pasan por el área de detección, interrumpen el haz y generan una señal en el fotodetector.

Los sensores electromagnéticos son aquellos que modifican el haz de luz en función del campo magnético ya que las propiedades cambian según la Ley de Faraday. Las fibras fluorescentes, por ejemplo, se excitan con la presencia de perturbaciones eléctricas como voltaje e intensidad, siendo capaces de proporcionar una medida cuantificable de ambos parámetros.

Los sensores que miden temperatura usan numerosos mecanismos de transducción. Unos de los más sencillos, con un rango de detección de temperaturas alto, se fijan en el aumento de la atenuación óptica a medida que sube la temperatura. Otros más complejos, que pueden funcionar hasta los 80 °C, utilizan materiales termosensibles, que hacen que el material cambie de coloración. Así, a simple vista, son capaces de distinguir el aumento de temperatura por decoloración del material.

A la hora de detectar radiaciones, se dopa la POF con distintos materiales que, al reaccionar con las partículas de radiación, generarán luz visible. Por ejemplo, para detectar radiación nuclear, se dopa el núcleo con polimetil fenil siloxano que genera una reacción química en la que se desprende luz del espectro azul. Para detectar rayos X, el núcleo se dopa con flúor orgánico y el revestimiento de material inorgánico, y generan luz visible en el espectro entre azul y verde.

La cantidad de sensores químicos es muy amplia gracias a la versatilidad de los materiales a la hora de fabricar las POF. Según la composición química de la fibra, ésta reaccionará con unos elementos químicos u otros. Algunos ejemplos incluyen la medida del PH (coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa) del ambiente que rodea la fibra y, por ende, el sensor, niveles de oxígeno, monóxido de carbono, amoníaco... También existen detectores de fuga de gas los cuales son muy útiles en el sector industrial, donde el ambiente es hostil y puede ser inflamable. En éste tipo de sensores, la fibra está recubierta con un material que, cuando se sumerge en acetona, aumenta su volumen y disminuye su índice de refracción [DavidSM] [ZubiaArrue].

### 3.2.4. TIPO DE MODULACIÓN

Los sensores de fibra óptica pueden codificar la información basándose en diferentes parámetros de la luz como son la intensidad (amplitud), la fase y la longitud de onda.

Los sensores de fibra óptica en los que la magnitud física provoca variaciones en la intensidad del haz de luz, son uno de los más utilizados e investigados en la actualidad. Emplean el método más sencillo de transducción, por lo que también los convierte en los más económicos al poder usar dispositivos comerciales de bajo coste. Gracias a esto están ganando terreno en aplicaciones tanto para la automatización, control y sensado en edificios y en áreas residenciales. Miden la atenuación de una señal luminosa, de una fuente conocida, cuando sobre la fibra actúa un estímulo externo. Aunque estos sensores usan un método de detección eficaz y económico, su principal inconveniente es la posible modulación de la intensidad por otras causas que no sean dadas por la variable física a medir. Existen posibles fuentes de pérdidas como la presencia de conectores, empalmes o curvaturas producidas en la fibra, que pueden ser parámetros de pérdidas indeseables si no son tenidos en cuenta a la hora de realizar la calibración del sistema. De manera similar, las fluctuaciones de potencia en la fuente se pueden dar por los propios drivers emisores y receptores del sensor o por accidentes que afecten al cableado de fibra. Para superar esta limitación y asegurar mediciones precisas, se debe implementar un canal de referencia de medida de potencia óptica, de tal manera que se asegure que la magnitud óptica de interés únicamente se deba a cambios sufridos por la magnitud física a medir. Esta técnica se conoce como auto-referencia [PFC-Guimar] [DavidSM].

En otra clasificación se encuentran los sensores ópticos que modulan la fase de la radiación luminosa que, son los más costosos, pero también los que ofrecen una mayor sensibilidad

respecto de la magnitud física a medir. La diferencia de fase entre la señal emitida y la recibida se calcula comparando dos señales periódicas idénticas transmitidas a través de dos caminos ópticos distintos en la que una se utiliza como referencia y la otra para medición. Estas soluciones de sensado se conocen como sistemas interferométricos, con la desventaja principal de requieren montajes complejos para su implementación, redundando en el coste de la solución propuesta.

En los sensores codificados en longitud de onda la información de la medida está contenida en el espectro de la señal óptica. A este grupo pertenecen los sensores basados en FBG, cuyo principio de funcionamiento hemos explicado anteriormente. Éstos se basan en modificar el índice de refracción del núcleo de la fibra para que refleje ciertas longitudes de onda y deje pasar otras **[LuNéJRo] [Udda]**. Mediante el empleo de un analizador de espectros óptico (OSA, Optical Spectrum Analyzer) es posible monitorizar la variación en la longitud de onda central de la luz debida a la magnitud física de interés.

## CAPÍTULO 4: COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

La comunicación inalámbrica es aquella que no utiliza cables y la comunicación se realiza con la modulación de ondas electromagnéticas. La comunicación alámbrica tiene varios inconvenientes. Entre otros aspectos, hay que tener en cuenta los gastos de instalación, que pueden incluir la deriva de muros y suelos, y el precio del propio cable que aumentará según la distancia entre los dispositivos que se desean comunicar. Adicionalmente, se necesitarían los conectores para enlazar los dispositivos. Ante eventos inesperados, como que se desenchufe un cable por accidente, la red puede quedar completamente inutilizada. Para poder solventar estos problemas, la tecnología ha ido evolucionando hasta crear comunicaciones inalámbricas de alto rendimiento. Sin embargo, cabe destacar que también existen ciertas desventajas con este tipo de comunicaciones. La más importante es la seguridad en la transmisión que sigue evolucionando para ser cada vez más robusta. Existen sistemas para encriptar la información pero cualquiera puede interceptar las ondas transmitidas. Estas ondas, según la tecnología utilizada, trabajan a cierta frecuencia y se pueden crear inhibidores de señales que generan interferencias a esa determinada frecuencia de trabajo para impedir las comunicaciones. Por otro lado, la velocidad de transmisión es más lenta que para sistemas cableados. Teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado, pasaremos a hacer un estudio de algunas comunicaciones inalámbricas para concluir con uno adecuado para nuestro sistema. Los protocolos de comunicación que vamos a analizar son Bluetooth, WiFi y ZigBee.

#### 4.1. BLUETOOTH

Bluetooth es un tipo de comunicación inalámbrica sin licencia que corresponde a la especificación industrial IEEE 802.15.1, y cuyo logo podemos ver en la figura 12. La velocidad de transmisión de datos varía dependiendo de la versión usada, que varía de 1 hasta 3 Mbps en las versiones más avanzadas [Bluetooth].



Figura 12: Logo de Bluetooth [Bluetooth].

Es un estándar de transferencia de datos y voz mediante un enlace por radiofrecuencia, que trabaja entre 2,4 y 2,485 GHz. Permite hasta 80 canales, separados 1 MHz entre ellos.

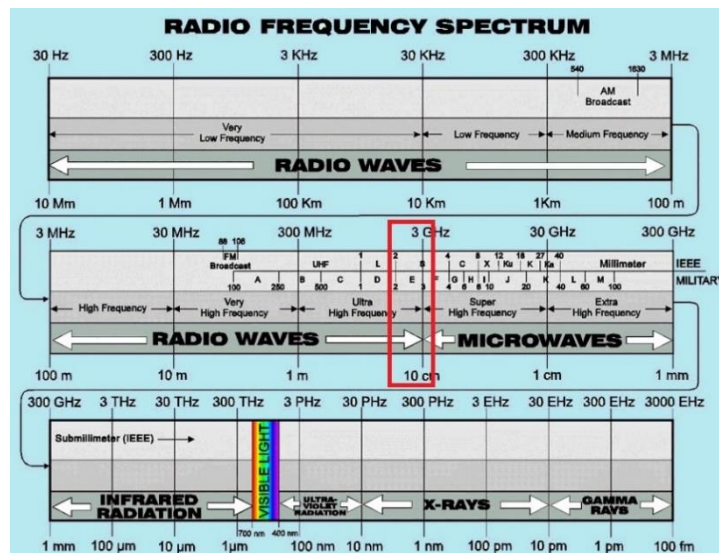


Figura 13: Localización de la frecuencia de trabajo de Bluetooth en el espectro de radiofrecuencia [Dons].

Antes de establecer comunicación, revisa los dispositivos existentes en su alcance para evitar usar los canales que ya están siendo utilizados. Para eso utiliza un mecanismo llamado “Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia” que corresponde a las siglas FHSS, en inglés, “Frequency-hopping spread spectrum”. El sistema prueba cada frecuencia hasta que encuentra una en la que se puede establecer una comunicación óptima. Esto hace que sea un sistema robusto incluso en ambientes con altas interferencias electromagnéticas. Permite comunicaciones punto a punto y punto a multipunto a distancias cortas, de entre 1 y hasta 100 metros usando repetidores. Según la distancia a la que queremos transmitir datos, la potencia de salida puede variar. Para transmitir a una distancia de 10 metros se consumen 1 mW y entre 100 mW y 1 W para versiones de largo alcance. La conexión de dispositivos puede seguir distintas arquitecturas. La conexión de tipo piconet, que se puede ver a la izquierda de la figura 14, permite la unión de

hasta 8 dispositivos compartiendo canal. La conexión de tipo scatternet, que se puede ver a la derecha de la figura 14, permite la unión de hasta 10 piconets.

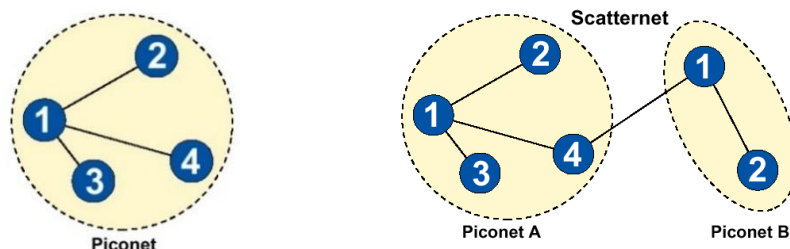


Figura 14: Conexión tipo piconet (izquierda) y scatternet de Bluetooth [decom].

Por desgracia, uno de los inconvenientes más importantes de Bluetooth es su falta de seguridad. Para usos domésticos, como puede ser establecer comunicación entre dispositivos de audio, la seguridad se reduce a pedir un código de autenticación antes de establecer la comunicación. En los casos en los que se necesita una seguridad más elevada, se encripta la información con 128 bits.

#### 4.2. WIFI

WiFi, cuyo logo se puede ver en la figura 15 y cuyas siglas corresponden a “Wireless Fidelity”, es un estándar que usa el protocolo de comunicación IEEE 802.11. Éste permite conectarse a redes locales inalámbricas, pero su uso más extendido es para el acceso a Internet, sustituyendo así el cable Ethernet para convertirlo en una comunicación inalámbrica **[WiFi]**.



Figura 15: Logo WiFi [WiFi].

La frecuencia de trabajo es la misma que en el caso de Bluetooth, 2,4 GHz, por lo que en las versiones más recientes se ha cambiado para evitar interferencias al usar ambas tecnologías a la vez. También usa el sistema de “frequency hopping” (FHSS) para encontrar canales disponibles. La velocidad de transmisión de datos depende del modelo usado ya que varía desde 1 hasta 54 Mbps. Aun así, puede ser una comunicación bastante lenta para algunas aplicaciones ya que los dispositivos deben ser localizados, y después sincronizados entre sí. La conexión de dispositivos puede seguir distintas arquitecturas. El sistema Ad-Hoc es una red descentralizada la cual permite que todos los dispositivos se comuniquen entre ellos sin seguir un orden específico. El sistema distribuido permite que los dispositivos se comuniquen usando puntos de acceso, como pueden ser “routers”, que permite la conexión hasta una distancia máxima de 100 metros, lo cual garantiza que la conexión es posible desde cualquier punto.





Figura 16: Arquitectura Ad-Hoc (izquierda) y sistema distribuido (derecha) en comunicación WiFi [Tkom].

Al igual que pasa con Bluetooth, la seguridad es el principal inconveniente de usar WiFi ya que cualquiera pueda interceptar la señal. Para esto, los expertos crearon el algoritmo WEP, cuyas siglas en inglés corresponden a “Wired Equivalent Privacy”, para encriptar la información transmitida con claves de hasta 128 bits. Un sistema más robusto es WPA, “Wi-Fi Protected Access”, que corrige las deficiencias del sistema anterior.

#### 4.3. ZIGBEE

ZigBee, cuyo logotipo se puede ver representado en la figura 17, es un protocolo de comunicación inalámbrica de alto nivel basado en el estándar IEEE 802.15.4. Su objetivo es proporcionar soluciones de bajo coste y consumo para espacios reducidos que necesitan un nivel de seguridad y control elevados [ZigBee].



Figura 17: Logo ZigBee [ZigBee].

Son redes inalámbricas de área personal que trabajan con una tasa de envío de datos baja de 250 Kbps y maximización de la vida útil de sus baterías ya que consumen 30 mA transmitiendo. Adicionalmente, estos dispositivos pueden entrar en modo reposo cuando no están recibiendo o enviando datos, cuyo consumo es de 3  $\mu$ A. Este tipo de comunicación está pensado para conectar numerosos dispositivos, hasta un máximo de 65.535 ( $2^{16}$ ) nodos distribuidos en subredes de 255 nodos, en un rango máximo de 100 metros en ambientes hostiles. Adicionalmente, a diferencia de las dos tecnologías mencionadas anteriormente, la seguridad no es un problema. Ésta está asegurada mediante el uso de un esquema de cifrado por bloques llamado AES 128 cuyas siglas corresponden a “Advanced Encryption Standard”.

Existen tres tipos de dispositivos. En cada red existe un solo nodo coordinador, ZC. Éste es el que crea la red estableciendo el canal de comunicaciones y el PAN ID (identificador de red). Los routers, ZC, son dispositivos opcionales que contribuyen a dirigir la información. Los dispositivos finales, llamados “End Device”, ZED, no interactúan entre sí y se encargan de recoger la información que les llega de los sensores y transmitirla al coordinador. Adicionalmente, según la manera en la que se conecten los dispositivos, existen tres topologías de red:

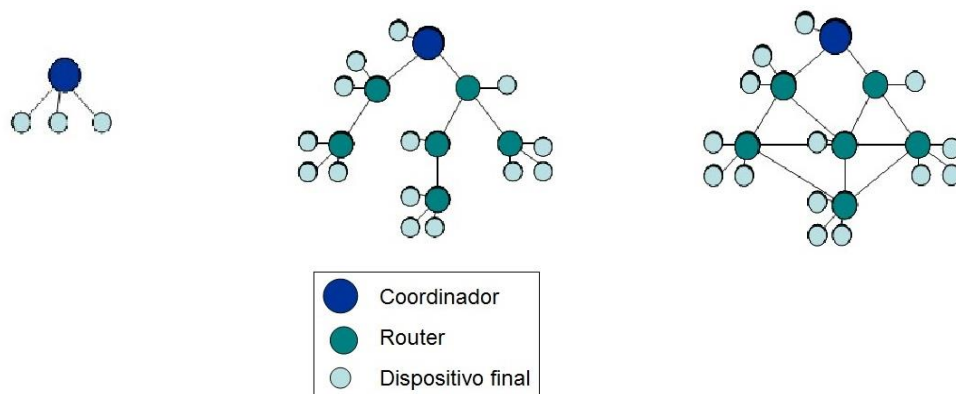


Figura 18: Topologías de ZigBee [GE].

En el esquema de la izquierda de la figura 18, podemos ver de manera visual cómo se compone la topología en estrella, en la que el coordinador se sitúa en el centro. Este esquema no utiliza routers. En la figura central podemos ver la topología en árbol en el cual, desde el coordinador se pueden conectar routers y a partir de estos, los dispositivos finales. En la figura de la derecha podemos ver la topología de malla en la que los nodos pueden tener más de dos conexiones. Esta última topología es una de las razones por la que ZigBee es ampliamente utilizado ya que le proporciona gran robustez a nuestro sistema. Para poder explicarla, en las siguientes tres imágenes se obtiene una idea clara de la importancia de la topología en malla. En la figura 19, vemos como los routers dirigen la información para transmitirla por el camino más corto. En cambio, si este camino es perturbado y alguno de estos dispositivos deja de funcionar, tendríamos un caso como el de la figura 20. La información no llegaría a su destino, por eso vemos que la lámpara deja de iluminar. Gracias a la robustez de ZigBee, los routers son capaces de enviar la información usando caminos alternativos al usado anteriormente. La solución final se puede ver en la figura 21.

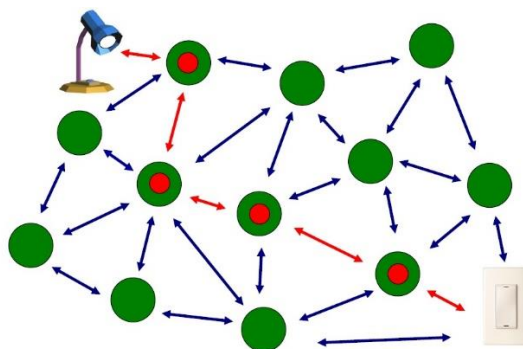


Figura 19: Funcionamiento de los routers de ZigBee (I) [Z-SShare].

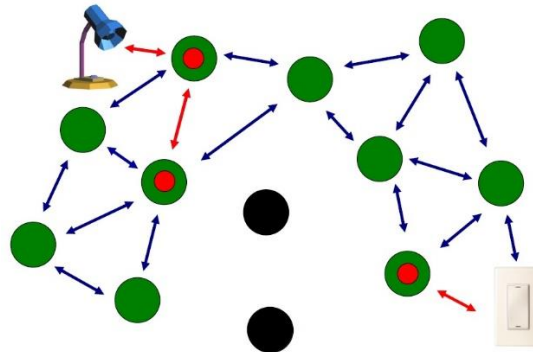


Figura 20: Funcionamiento de los routers de ZigBee (II) [Z-SShare].

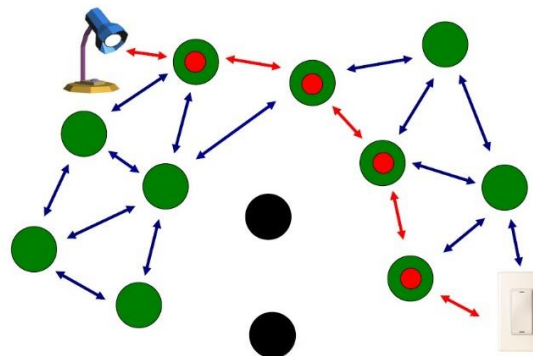


Figura 21: Funcionamiento de los routers de ZigBee (III) [Z-SShare].

Tras hacer un breve estudio de las posibles formas de comunicación inalámbrica, diremos que para este proyecto, la elección más acertada sería usar tecnología ZigBee [ITRI] [GE]. ZigBee fue diseñada expresamente para enviar información dada por sensores en ambientes con altas interferencias electromagnéticas. En la cabeza de una turbina eólica, cabría esperar muchas perturbaciones, tanto mecánicas, dadas por vibraciones y el propio movimiento de las aspas, como electromagnéticas, dadas por todos los sistemas electrónicos presentes. Adicionalmente, la información que tenemos que ser capaces de enviar, la que nos dará el sensor óptico, no es una cantidad de datos elevada por lo que la velocidad de ZigBee de 250 Kbps, cubriría las especificaciones. Otro aspecto positivo es el ahorro de batería, ya que los dispositivos pueden entrar en modo de reposo si no están recibiendo o enviando datos. Igualmente, dentro de un parque eólico, el número de aerogeneradores presentes es un parámetro a tener en cuenta, proporcionando ZigBee un protocolo de transmisión adecuado y adaptativo para una topología distribuida o en forma de malla de sensores como la que podría constituir el conjunto de aerogeneradores de dicho parque. Para trabajos futuros también cabría destacar que la red se podría ampliar a otros sensores, ya que, como hemos dicho anteriormente, podemos llegar a conectar 65.535 dispositivos [ZigBee].

## CAPÍTULO 5: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se pretende dar una visión general del diseño del sistema implementado en este proyecto que integra las diferentes tecnologías comentadas con anterioridad en las secciones previas de esta memoria. El proyecto se podría dividir en dos partes: diseño e implementación del sensor de fibra óptica y el envío de la información mediante el protocolo de comunicación inalámbrica Zigbee.

La primera parte corresponde con el diseño e implementación del FOS, el cual se compone del driver emisor, el codificador y el driver receptor. El driver emisor consta de un LED con conector de POF y su correspondiente etapa de acondicionamiento. Este circuito corresponde a un circuito de transconductancia que proporciona alta estabilidad y un gran ancho de banda. Como veremos, la potencia óptica emitida por el LED depende de la intensidad que lo recorre y deberemos ajustarla para que sea capaz de emitir la mayor potencia óptica posible. El driver receptor por otro lado, está formado por un fotodetector con conector de POF y su correspondiente etapa de acondicionamiento. La luz reflejada en el encoder será capturada por el extremo de su fibra y nos dará un nivel de tensión como dato final. Para ello, se ha utilizado un circuito de amplificador de transimpedancia. La elección de una de las resistencias presentes en el circuito varía según las pérdidas que se producen en la reflexión por lo que será establecida una vez que se implemente el sistema y se conozcan las pérdidas totales. El resultado del circuito será voltaje negativo que no puede ser leído por una placa Arduino, por lo que hemos incorporado una etapa inversora. En la figura 22 podemos ver la placa en la que aparecen ambos drivers soldados. Podemos ver también las dos POF que guiarán la luz al encoder diseñado, y la salida Vo' que irá a la placa Arduino UNO.

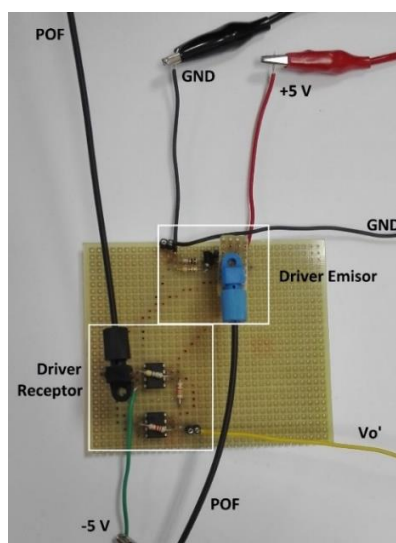


Figura 22: Aspecto real del driver emisor y el driver receptor del FOS diseñado

El encoder diseñado es capaz de funcionar como un giróscopo óptico y a su vez medir la velocidad angular del objeto al que se une. Gracias al uso de franjas negras que reflejan poca luz, seremos capaces de generar pulsos y calcular la velocidad de rotación. Por otro lado, gracias a una escala de grises, podemos hacer que el sistema se comporte como un giróscopo óptico. Si el objeto en el que está implementado el encoder se mueve horizontalmente, la luz reflejará en una tonalidad de gris diferente y la salida del sensor será distinta en cada caso. Así podemos establecer una relación entre la información proporcionada por el sensor y la tonalidad de gris y por extensión los grados de inclinación del objeto. Esto último requiere una calibración que relacione al ángulo de inclinación que queremos medir con cada tonalidad de gris del encoder. En la figura 23, podemos ver la POF que sale de los drivers emisor y receptor y recorre cierta distancia hasta reflejar en el encoder. Se han usado 3 metros de fibra POF (3 m de ida 3 m de vuelta) entre los drivers y el encoder para demostrar que las pérdidas por POF no son significativas y que el sistema se podría implementar suficientemente alejado del objetivo de sensado si así se requiriera.

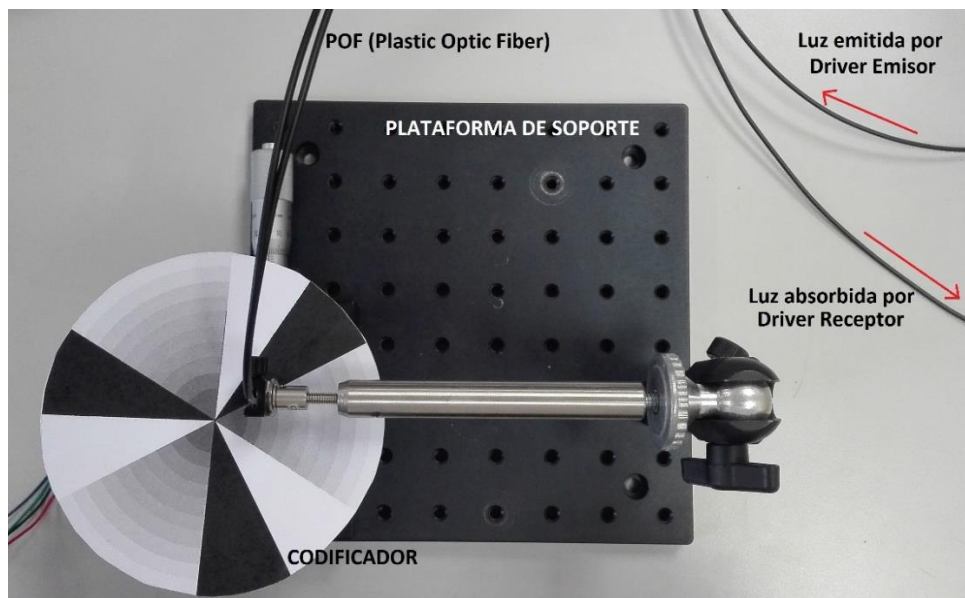


Figura 23: Vista de planta de la plataforma de soporte, motor y encoder usados en el sistema de reflexión de luz

Gracias a la plataforma de soporte, hemos podido colocar los extremos de las dos fibras ópticas de plástico (emisor y receptor) una junto a la otra. El encoder se ha colocado en una superficie horizontal y las dos fibras, verticales a ésta, de tal modo que la incidencia fuese máxima. Para poder simular la velocidad de rotación de un aerogenerador, se ha utilizado un motor de paso, como podemos ver en la figura 24, controlado por un programa diseñado con LabVIEW con el que podemos establecer una velocidad de giro constante. La implementación del motor y el programa que lo controla no entra en el alcance del presente proyecto ya que se ha utilizado expresamente para poder simular el comportamiento de un aerogenerador.

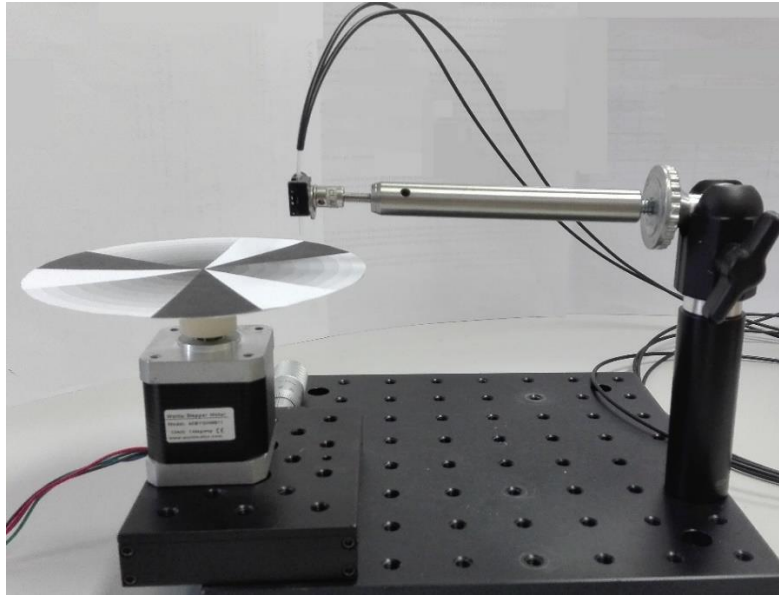


Figura 24: Vista de perfil de la plataforma de soporte, motor y encoder usados en el sistema de reflexión de luz

Por otro lado, para poder reflejar en distintas tonalidades de gris, hemos empleado un soporte que convierte los grados de giro en movimiento horizontal, como indica la flecha de la figura 25. Así podemos simular el cambio de ángulo de ataque de las aspas de un aerogenerador.

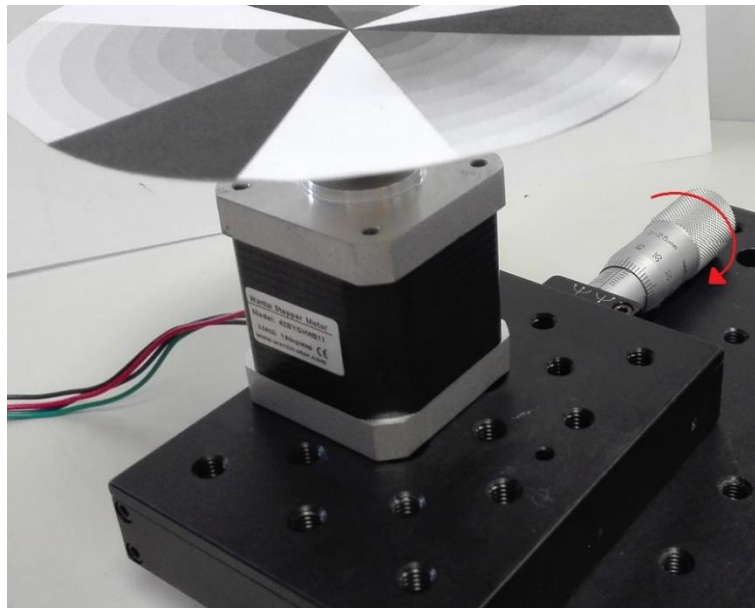


Figura 25: Detalle de la plataforma de conversión giro – movimiento lineal

Por desgracia, la resolución del motor a bajas revoluciones es muy pobre y no se consigue un movimiento homogéneo. Para poder simular la velocidad de rotación en estos casos, se ha utilizado un rodamiento cuyas partes se pueden ver en la figura 26. Se compone de una parte fija y una móvil que gira junto al codificador diseñado. Para poder reflejar en distintas tonalidades de gris, se puede mover el rodamiento de forma horizontal.



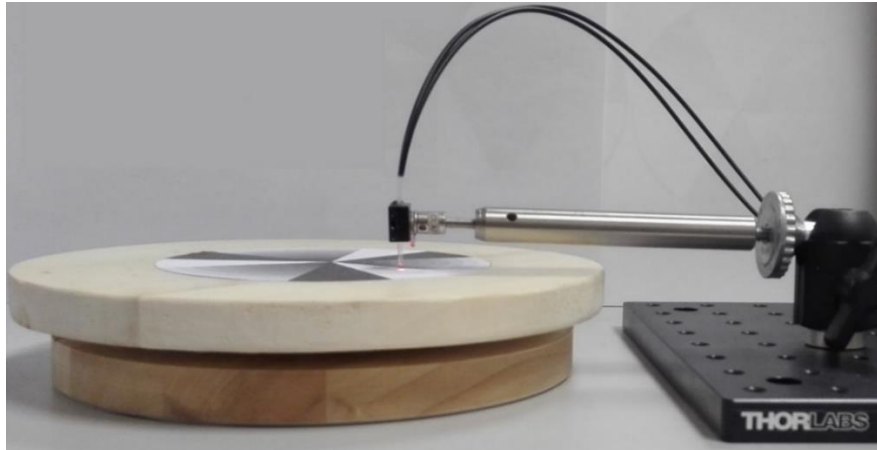


Figura 26: Vista de perfil de la plataforma de soporte, rodamiento y encoder usados en el sistema de reflexión de luz

Como veremos en un capítulo posterior donde se mostrarán las medidas de calibración realizadas, la distancia de reflexión es la que existe desde el extremo de la fibra óptica hasta la superficie de reflexión, representada en la figura 27, y a una distancia de 3 mm nos proporciona el voltaje máximo a la salida del driver. También haremos una caracterización del encoder con la que obtendremos un rango de voltajes para cada color del encoder y nos será de gran utilidad a la hora de diseñar la interfaz gráfica usando LabVIEW.

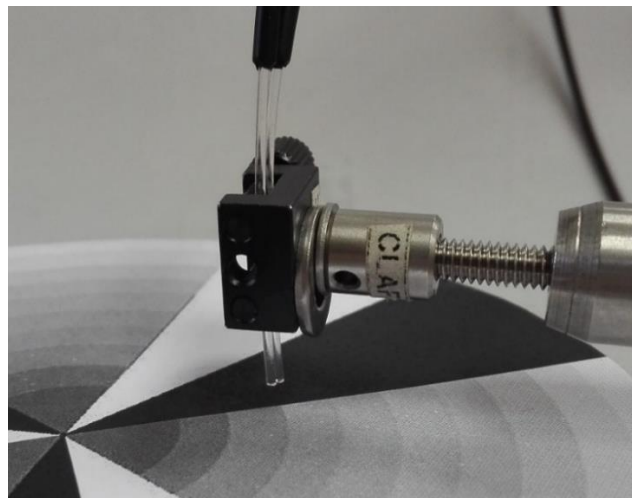


Figura 27: Distancia de reflexión entre los extremos de las POF y el encoder diseñado

La segunda parte del proyecto consiste en la interrogación remota. En esta parte del proyecto, tenemos que conseguir configurar un módulo Arduino-Xbee como el emisor y otro como receptor. Con esto conseguimos establecer una red punto a punto en la que el dispositivo receptor irá conectado al PC y recibe la información del otro dispositivo, el cual está situado cerca del FOS que hemos diseñado. Zigbee es un protocolo diseñado expresamente para lugares hostiles con altas interferencias electromagnéticas como es el caso de la cabeza de un aerogenerador. Una turbina que no esté en funcionamiento provoca grandes pérdidas económicas a la empresa en cuestión por lo que la instalación inicial deberá ser sencilla para evitar largos periodos de inactividad. Usando comunicaciones inalámbricas, se evita tener un

sistema invasivo que requiere largas distancias de cableado. Tras leer el voltaje  $V_o'$  (voltaje de salida del driver receptor, ver figura 22), la placa Arduino se comunicará a través del puerto serie con un módulo Xbee que usa el protocolo de comunicación inalámbrica Zigbee. Se conectará a la placa Arduino a través de una placa de expansión conocida como "Xbee Shield". Ésta contiene unos "jumpers" selectores que son de vital importancia y tienen dos posiciones: posición Xbee o posición USB.

- Con los jumpers en la posición Xbee los datos enviados desde el microcontrolador serán enviados de forma inalámbrica por el módulo Xbee. Este modo será usado en el módulo Arduino-Xbee emisor, cuyo aspecto se puede ver en la figura 28.
- Con los jumpers en la posición USB y quitando el microcontrolador de la placa Arduino, el módulo Xbee puede comunicarse directamente con el ordenador a través de un cable USB. Este modo será usado en el módulo Arduino-Xbee receptor, cuyo aspecto se puede ver en la figura 29.



Figura 28: Aspecto del módulo Arduino-Xbee emisor

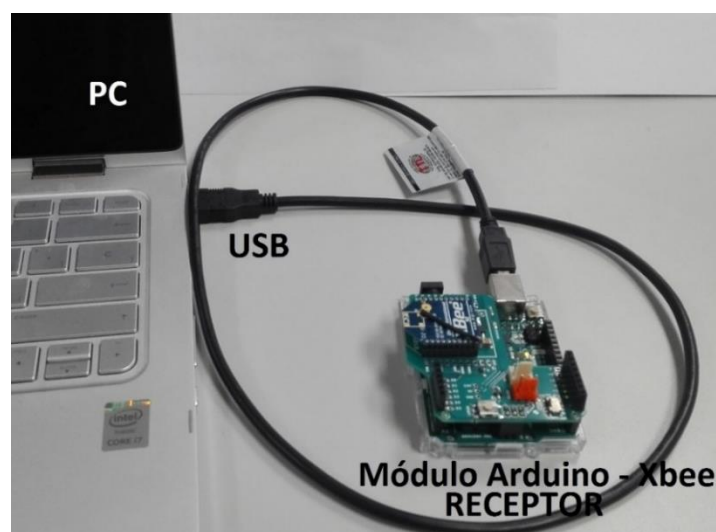


Figura 29: Aspecto del módulo Arduino-Xbee receptor



La información que nos llega al PC puede ser manipulada para satisfacer los requisitos del proyecto. Para esto, hemos creado un programa con LabVIEW, un software de desarrollo de sistemas de National Instruments, que utiliza un lenguaje de programación gráfico. Cada programa contiene un panel frontal con el que el usuario puede interactuar y observar cómo los datos son actualizados en tiempo real. Así facilitamos la tarea del usuario al ofrecer una interfaz gráfica fácil de entender. El panel frontal de nuestro programa se puede ver en la figura 30.



Figura 30: Panel frontal del programa LabVIEW diseñado

## CAPÍTULO 6: DISEÑO Y DESARROLLO DEL SENSOR ÓPTICO

### 6.1. DRIVER EMISOR

#### 6.1.1. ELECCIÓN DEL LED

Debemos tener en cuenta que existen distintas pérdidas en el camino recorrido por el haz de luz. Este camino está representado en la siguiente figura.

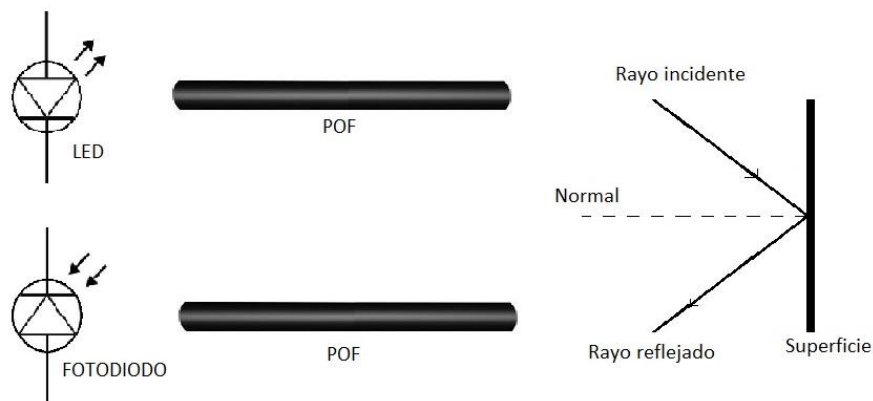


Figura 31: Recorrido del haz de luz

La luz emitida por el LED tiene una potencia lumínica que depende, entre otros factores, de la corriente que atraviesa el dispositivo. Esta corriente deberá ser fijada mediante el circuito de acondicionamiento del LED para que la potencia emitida sea la inicialmente diseñada. El haz de luz emitido por el LED será transmitido por una fibra óptica de plástico que, transmite mejor algunas longitudes de onda que otras, en función de su espectro o curva de atenuación. El haz de luz se reflejará sobre una superficie reflectora, en particular, un codificador de escala de grises (encoder óptico), que reducirá significativamente la potencia recibida. Por último, haremos un estudio de la respuesta del fotodiodo, ya que su rendimiento depende de la longitud de onda que le incide.

Tras todo esto podemos concluir que la elección del LED se reduce en elegir una longitud de onda adecuada para la cual las pérdidas de inserción del esquema sensor propuesto se puedan reducir o ser optimizadas. Estos puntos críticos se encuentran en la transmisión de la luz a través de la fibra óptica, las pérdidas de inserción del esquema sensor implementado y en la recepción del fotodiodo.

#### 6.1.1.1. TRANSMISIÓN POR POF SEGÚN LA LONGITUD DE ONDA DE OPERACIÓN

Para ello tenemos que ver la curva de atenuación espectral de la fibra óptica de plástico, representada en la figura 8 del capítulo 3 “Sensores Ópticos” y, de nuevo en éste capítulo, que nos muestra la atenuación que se produce en función de decibelios por kilómetro (dB/Km), según la longitud de onda con la que estemos trabajando [ZubiaArrue].

Según se comentó en el Capítulo 2 de la memoria, existen varias longitudes de onda susceptibles de ser transmitidas a través de la fibra POF y que presentan un buen comportamiento en relación a su correspondiente coeficiente de atenuación. A pesar de no ser una longitud de onda que presenta un mínimo de atenuación, según la figura 8, que volvemos a mostrar, la longitud de onda de operación finalmente escogida será de  $\lambda=650\text{nm}$ , correspondiente al espectro visible color rojo. Aquí las pérdidas por kilómetro son ligeramente superiores en comparación con 475nm, 525nm y 575nm, respectivamente; alrededor de los 130 dB/km (0,13 dB/m). Aunque, en comparación, las pérdidas puedan parecer significativas, no es un dato determinante ya que en este proyecto vamos a trabajar con una longitud de fibra por debajo de los 10 metros, no kilómetros, por lo que las pérdidas no serán significativas. Adicionalmente, hay que tener en cuenta, que los componentes que trabajan a una longitud de onda alrededor del espectro rojo son más económicos y su fabricación se encuentra bastante estandarizada y optimizada en costes.

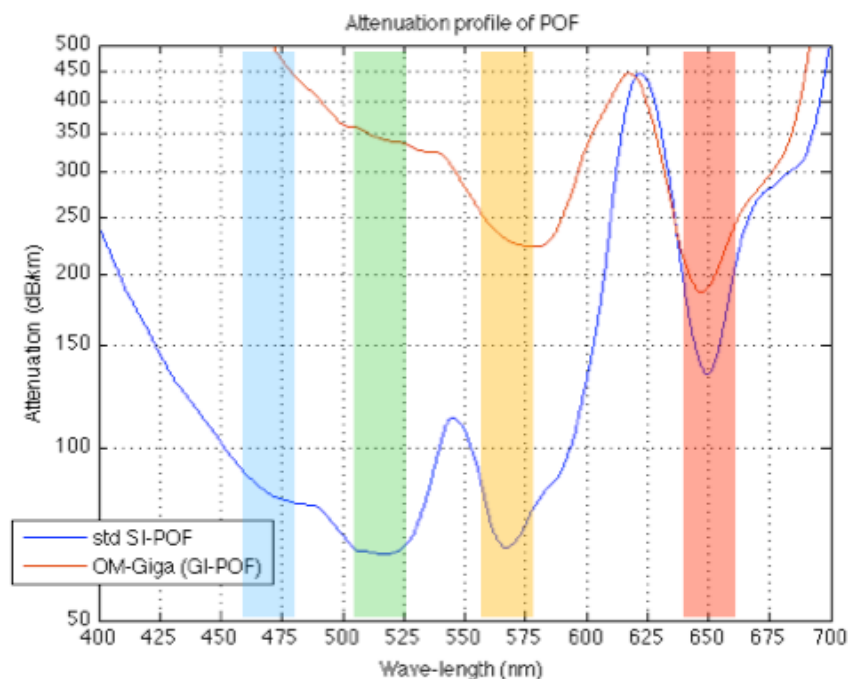


Figura 8: Perfil de atenuación de una POF [KDPOF].

#### 6.1.1.2. RESPUESTA DEL FOTODIODO SEGÚN LA LONGITUD DE ONDA DE OPERACIÓN

El fotodiodo usado en este proyecto será uno adaptado para el uso de fibra óptica de plástico. Industrial Fiber Optics es una empresa dedicada al diseño, construcción y distribución de componentes que usan fibra óptica. Sus productos son utilizados en numerosos campos como podrían ser la automatización, el sector industrial, la medicina, etc. [IFO] Se han elegido los componentes de esta distribuidora por numerosas razones. Entre ellas cabe destacar el bajo coste, el cual se puede ver reflejado en el presupuesto. Además, Industrial Fiber Optics ofrece productos adaptados, no sólo para fibra óptica de vidrio o sílice, sino también de plástico, que permiten una conexión rápida y sencilla. La fibra se incorpora mediante el ajuste manual de roscas de plástico y, a su vez, es fácil de incorporar a un circuito electrónico ya que consta de sólo dos terminales que corresponden al ánodo y al cátodo. Entre su extensa oferta de fotodetectores, el llamado IF-D91 se corresponde con un fotodiodo tipo PIN, ver figura 32.

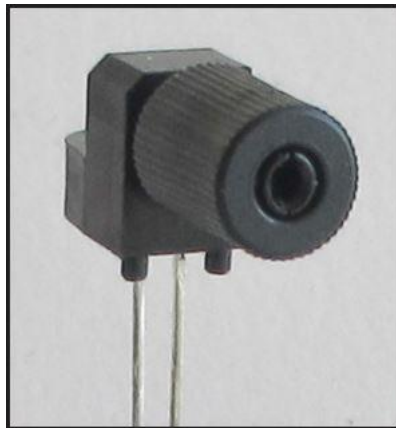


Figura 32: Fotodiodo IF-D91 [Anexo 2].

Este dispositivo se compone de una micro lente y una cubierta de plástico polimérico termoplástico usado como aislante en la industria de la electrónica (PBT) [VampTech], que asegura una unión óptima si se emplea un cable estándar de fibra óptica de plástico con un núcleo de 1 mm y una cubierta de 2,2 mm. Su respuesta se extiende de los 450 a los 1100nm de longitud de onda, por lo que es compatible tanto con luz visible como parte de la infrarroja. Tiene el ancho de banda más amplio de todos los fotodetectores ofertados con similares características, con un tiempo de respuesta de tan sólo 15 ns lo que lo hace ideal para aplicaciones analógicas y digitales de alta velocidad de transmisión [IFO].

A continuación, sacada de la hoja de características del IF-D91, se muestra la figura 33 que representa la respuesta del fotodiodo, parámetro denominado responsividad  $\mathcal{R}$  (A/W).

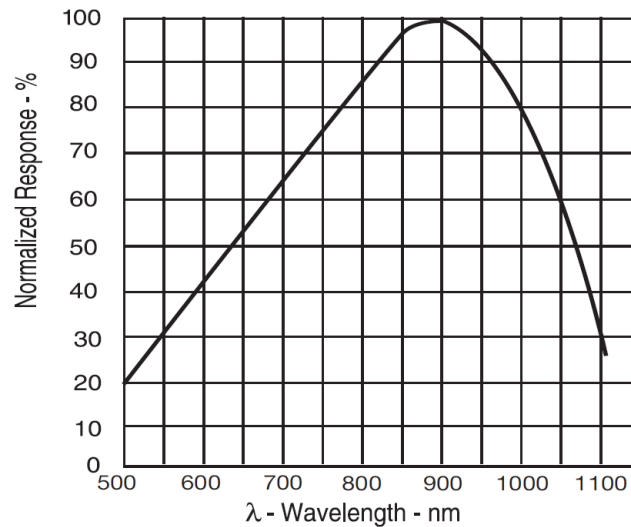


Figura 33: Respuesta del fotodiodo según la longitud de onda incidente [Anexo 2].

Esta gráfica nos muestra la respuesta del fotodiodo según la longitud de onda que recibe. Para una longitud de onda de 880nm aproximadamente, su rendimiento será máximo; del 100%. Por desgracia, como acabamos de ver, para una longitud de onda de infrarrojos, existen una gran cantidad de pérdidas en la fibra óptica de plástico. Otra de las posibilidades que hemos estudiado es usar un LED de luz azul. El color azul corresponde con una longitud de onda de 475nm, el cual no pertenece al rango de captación óptimo del fotodiodo. Si usásemos un LED de color verde, una longitud de onda de 525nm, la respuesta del fotodiodo sería del 25% aproximadamente. Es decir, el rendimiento sería una cuarta parte del que podríamos tener. Teniendo en cuenta todas las pérdidas hasta que la luz llega al fotodiodo, la corriente producida por el fotodiodo sería muy pequeña. De hecho, cuanto más nos acerquemos al infrarrojo, mejor rendimiento tendrá el fotodiodo. Por esta razón ante el color rojo, que tiene una longitud de onda mayor que el verde, de 650nm, el fotodiodo tiene mejor respuesta. Para ser más precisos, la respuesta es un poco superior al 50% respecto de su valor nominal, típicamente con  $\mathcal{R}$  (A/W)=0.4 A/W.

#### 6.1.1.3. ELECCIÓN DEL MODELO DE LA FUENTE DE LUZ LED

Tras haber analizado todas las pérdidas presentes en el camino recorrido por el haz de luz, concluimos que un LED de luz roja, con una longitud de onda alrededor de 650nm, es una buena opción para el presente proyecto. Como ya hemos explicado anteriormente, el componente que vamos a usar será proporcionado por Industrial Fiber Optics ya que el diseño integrado que ofrecen, permiten una implementación simple y de bajo coste. Al acceder a su catálogo, vemos que hay cuatro posibles LEDs que podemos usar ya que su longitud de onda corresponde al color rojo. Estos LEDs son llamados IF-E96, IF-E97, IF-E98 y IF-E99. Como podemos ver en las hojas de características, los dos últimos son usados para comunicaciones por lo que su tiempo de respuesta es del orden de nano segundos. En este proyecto, no necesitamos unos componentes

con un rendimiento tan alto. Cualquiera de los dos restantes valdría ya que el tiempo de respuesta no es determinante y son notablemente más económicos. Físicamente, ambos tienen el mismo diseño por lo que su implementación es idéntica. En este proyecto nos vamos a decantar por el IF-E97 por ser un LED de mayor potencia y de mayor longitud de onda respecto de otros modelos de similares características [IFO].

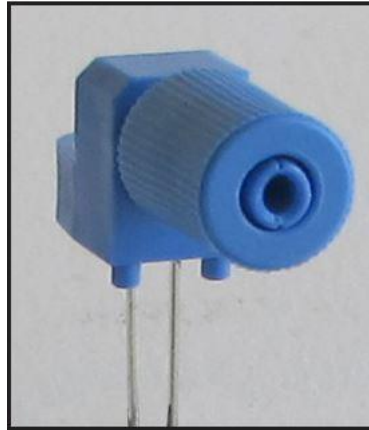


Figura 34: LED IF-E97 [Anexo 1].

El dispositivo LED se compone de una micro lente y una cubierta de PBT que asegura una unión óptima si se emplea un cable estándar de fibra óptica de plástico con un núcleo de 1 mm y una cubierta de 2,2 mm. La fibra se incorpora mediante el ajuste manual de roscas de plástico y, a su vez, es fácil de incorporar a un circuito electrónico ya que consta de sólo dos terminales que corresponden al ánodo y al cátodo. Como hemos visto antes, el fotodiodo, tiene una mejor respuesta cuanto más nos acercamos al espectro de infrarrojos; 900nm. La longitud de onda del LED IF-E97 es de 660 nm frente a los 645 nm del IF-E96. Aunque no se necesita una gran velocidad de transmisión en este proyecto, el tiempo de respuesta de este LED es de 0,5  $\mu$ s lo que lo convierte en el LED más económico para una gran variedad de aplicaciones analógicas y digitales de alta velocidad de transmisión.

### 6.1.2. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO PROPUESTO: DRIVER EMISOR

Una vez que hemos decidido usar el IF-E97, debemos pensar en el diseño de la placa driver del emisor. Esto consistirá en la elección de componentes, acompañada de una justificación, por medio de simulaciones usando el programa de National Instruments llamado Multisim [Multisim].

Según la intensidad que recorre el LED, emitirá una potencia óptica que será recibida en recepción por el fotodetector en función del principio de sensado propuesto. Nos interesa diseñar un circuito que mantenga el LED configurado a un punto de potencia media estable fijando la corriente que circula por él. El transistor es un dispositivo cuya resistencia interna puede variar en función de la señal de entrada. Esta variación de resistencia provoca que sea

capaz de regular la corriente que circula por el circuito al que está conectado. Al ser capaces de regular la intensidad que circula por el LED, seremos capaces de controlar la potencia óptica emitida por este. Por estos motivos, el circuito electrónico del driver emisor que se va a usar para la etapa de acondicionamiento del LED, que se puede ver en la figura 35, corresponde a un circuito con transistor BJT de polarización de corriente continua por divisor de voltaje. Es un circuito de transconductancia ya que transforma un voltaje de entrada, en una corriente a la salida. Este circuito tiene una alta estabilidad y un gran ancho de banda. En este esquema también se incluye una polarización de corriente alterna por si en trabajos futuros hiciese falta hacer una modulación analógica de la señal.

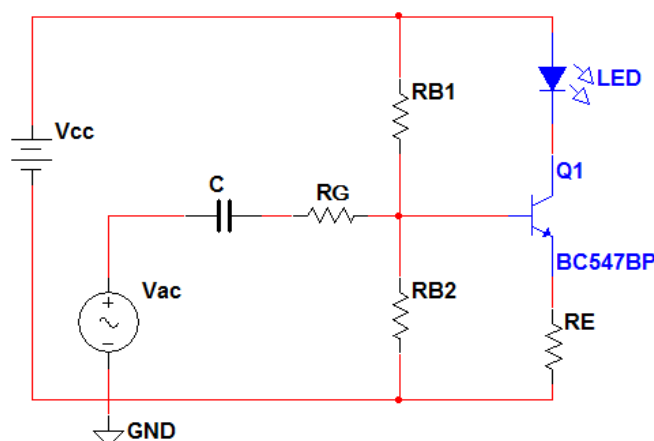


Figura 35: Circuito propuesto del driver emisor

Hay que tener en cuenta que la señal final será capturada por una placa de Arduino la cual tiene un convertidor analógica digital que trabaja con un voltaje de referencia de entre 0 y 5 V. En sus pines de entrada analógica, sólo podrá recibir un voltaje de hasta 5V por lo que podemos concluir, que, para poder trabajar con una única fuente de alimentación que alimente a todos los dispositivos presentes en el proyecto, tendrá que ser de -5 a 5V.

El transistor que se va a usar en este caso es un BJT BC547. Los parámetros que hemos tenido en cuenta para tomar esta decisión son varios. Primero, la corriente máxima que puede atravesar el transistor,  $I_C$ , vendrá dada por la que atraviesa el LED. Según el fabricante, el LED no puede soportar una corriente superior a los 40 mA. En el caso de este transistor la corriente máxima es de 100 mA que es muy superior a ésta. Por otro lado, la tensión con la que estamos trabajando no es elevada por lo que los datos dados en las hojas de características sobre tensiones máximas de polarización en continua del transistor se cumplen. Adicionalmente, una vez diseñado el circuito al completo, habrá que asegurarse que el transistor está funcionando en su región activa.

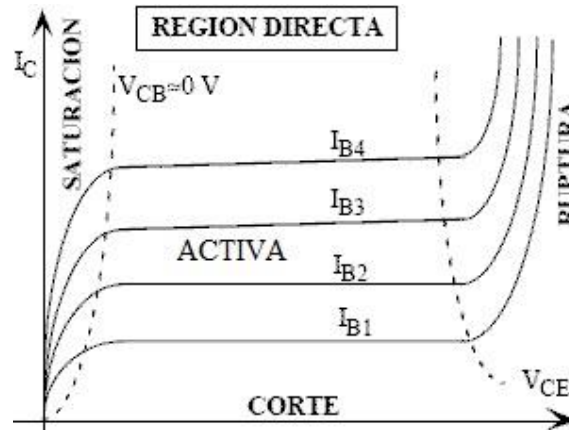


Figura 36: Zonas de funcionamiento de un transistor bipolar [Unicrom].

El transistor se encuentra en su zona de corte cuando no circula corriente por sus terminales. La región activa es la normal de funcionamiento del transistor. Existen corrientes en todos sus terminales y se cumple que la unión base-emisor se encuentra polarizada en directa y la colector-base en inversa. En la región de saturación se dejan de cumplir las relaciones de activa, y se verifica que tanto la unión base-emisor como la base-colector se encuentran en directa.

Según la intensidad que recorre el LED, éste emitirá un cierto nivel de potencia óptica. Con el circuito propuesto podemos mantener el LED emitiendo entorno a ese punto de potencia fijando la corriente  $I_{LED}$ . Podemos diseñar los valores para establecer esa corriente que nos interesa.  $I_{LED}$  es igual a la corriente del colector del transistor. A su vez, podemos asumir que  $I_{LED}$  es la corriente del emisor del transistor, como podemos ver en la ecuación 6.1:

$$I_C = I_E \cdot \frac{\beta}{\beta + 1} \approx I_E \cdot \frac{\beta}{\beta} \approx I_E \quad (6.1)$$

donde,  $\beta$  es la ganancia en corriente que, a partir de la hoja de características, es igual a 150. Al ser éste un número muy grande, frente a 1, podemos suponer que sigue siendo  $\beta$ .

Primero aplicamos la Ley de Voltaje de Kirchhoff, obteniendo la ecuación 6.2:

$$V_B = V_{BE} + R_E \cdot I_{LED} \quad (6.2)$$

$$I_{LED} = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} \quad (6.3)$$

donde:

- $V_B$  corresponde a la tensión en la base del transistor.
- $V_{BE}$  es la caída de tensión entre la base y el emisor del transistor que viene dada por el fabricante del componente BJT BC 547.
- $R_E$  corresponde a la resistencia colocada en el emisor del transistor.



Con la ecuación 6.3 podemos concluir que la intensidad que atraviese el LED depende de la tensión en la base del transistor,  $V_B$ , y la resistencia en el emisor del transistor,  $R_E$ . Para establecer un punto de trabajo correcto, primero hay que diseñar el divisor de tensión por medio de las resistencias  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$ . El valor de estas resistencias que harán que posteriormente  $R_E$  tenga un valor óptimo es de 1 k $\Omega$  cada una. Para poder formular esta ecuación, hemos supuesto que la corriente que atraviesa la base del transistor,  $I_B$ , es despreciable.

$$V_B = +V_{cc} \cdot \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = 2,5 \text{ V} \quad (6.4)$$

donde  $V_{cc}$  se corresponde a la alimentación de corriente continua del circuito.

Si nos encontramos en la región activa, se cumple la siguiente ecuación:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (6.5)$$

Podemos concluir que la corriente en la base del transistor es 150 veces más pequeña que la que atraviesa el colector por lo que se puede suponer despreciable para simplificar los cálculos.

Una vez sabemos el valor del voltaje en la base del transistor, podemos proceder al diseño de  $R_E$  despejándola de la ecuación 6.3 obtenida anteriormente.

$$R_{E \min} = \frac{V_B - V_{BE}}{I_{LED \max}} = \frac{2,5 - 0,6}{40 \cdot 10^{-3}} = 47,5 \Omega \quad (6.6)$$

donde  $V_{BE}$  es la caída de tensión entre la base y el emisor del transistor, que, según la hoja de características del BJT BC 547, corresponde a 0,6 V tanto en ON como en ACTIVA.

$I_{LED}$  es la corriente que atraviesa el LED, la cual es máxima en 40 mA. Para valores superiores, la integridad del componente no está asegurada. Adicionalmente, en la hoja de características, nos indican la potencia óptica que emite el LED que puede rondar los 425  $\mu$ W para un valor de  $I_{LED}$  de 20 mA. Posteriormente, se realizará un estudio de la potencia óptica emitida según la intensidad que recorre el LED, ya que el fabricante sólo marca un rango de potencias, no establece una curva explicando la relación entre ellas.

Este valor nos indica el valor más pequeño que puede tener  $R_E$ . Para valores inferiores, la corriente que atraviesa el LED sería superior a 40 mA y, como hemos dicho, se podría quemar el LED. Los valores estándar de las resistencias son conocidos como valores preferentes, establecidos por la EIA, The Electronic Industries Alliance. Estos valores se muestran a continuación, en la figura 37, y corresponden a una guía estándar utilizada en diseño industrial para seleccionar valores característicos de un producto.

E6 (20%)	E12 (10%)	E24 (5%)	E48 (2%)	E96 (1%)	E192 (0.5%, 0.25%, 0.1%)	E6 (20%)	E12 (10%)	E24 (5%)	E48 (2%)	E96 (1%)	E192 (0.5%, 0.25%, 0.1%)	E6 (20%)	E12 (10%)	E24 (5%)	E48 (2%)	E96 (1%)	E192 (0.5%, 0.25%, 0.1%)
100	100	100	100	100	100	220	220	220	215	215	215	470	470	470	464	464	464
				101	101					218	218					470	470
			102	102	102				221	221	221				475	475	475
				104	104					223	223					481	481
			105	105	105				105	226	226				226	487	487
		106			106			229	229		493			493			
		110	107	107	107			232	232	232	511			511	511		
				109	109				234	234				505	505		
			110	110	110				237	237				237	517	517	517
				111	111					240				240		523	523
	113		113	113	243				243	243				530	530	530	
		114	114	246				246	536	536							
	115	115	115	249	249			249	536	536	536						
		117	117		252			252		542	542						
	120	120	118	118	118			255	255	255	549			549	549		
				120	120				258	258				556	556		
			121	121	121				261	261				261	562	562	562
				123	123					264				264		569	569
			124	124	124					274				274		274	590
		126		126	271			271			583			583			
127		127	127	274	274	274	590	590		590							
		129	129		277	277		597	597								
130		130	130	130	280	280	280	619	619	619							
			132	132		284	284		612	612							
	133	133	133	287		287	287		619	619	619						
		135	135			291	291			626	626						
	137	137	137			294	294			294	620	620	620				
138		138	298		298		642	642									
150	150	150	140		140	140	300	300		300	649	649	649				
				142	142	305		305	657	657							
			143	143	143	301		301	301	680		680	680				
				145	145			309	309			665	665				
			147	147	147			316	316			316	680	680	680		
		149		149	320		320		681		681						
		154	150	150	150		330		330		330	680		680	680		
				152	152	324			324	698	698						
		154	154	154	332	332			332	715	715			715			
			156	156		336		336	715		715						
	158	158	158	340		340		340	750		750		750				
		160	160			344	344	732			732						
	160	162	162			162	348	348			348	750	750	750			
			164		164	352		352		759	759						
		165	165		165	365		365		365	787		787	787			
			167	167	361			361	768	768							
		169	169	169	365			365	365	787			787	787			
	172		172	370			370	796	796								
	180	180	174	174			174	379	379			379	806	806	806		
				176		176	383		383		816	816					
			178	178		178	383		383		383	820		820	820		
				180	180	388			388	825	825						
			182	182	182	402			402	402	866			866	866		
		184		184	397			397	845	845							
187		187	187	402	402			402	866	866			866				
		189	189		412		412	887		887							
191		191	191		422		422	422		910		910	910				
		193	193			417	417	898			898						
196		196	196			430	430	430			953	953	953				
		198	198	427			427	909	909								
200		200	200	442			442	442	953			953	953				
		203	203		437		437	942		942							
205	205	205	442		442		442	976		976		976					
	208	208			448	448	965			965							
210	210	210			453	453	453			976	976	976					
	213	213		459		459	988		988								

Figura 37: Valores comerciales de las resistencias [ECIA].

El origen de los valores preferentes se remonta a comienzos del siglo pasado, cuando la mayoría de las resistencias estaban compuestas de carbono y grafito, lo cual les proporcionaba tolerancias muy bajas. Por este motivo se decidió establecer qué resistencias se pueden fabricar, según su porcentaje de tolerancia **[ECIA]**. Podemos ver que la figura 37 está separada por columnas que corresponden a distintas tolerancias:

- E6 corresponde a un 20% de tolerancia.
- E12 corresponde a un 10% de tolerancia.
- E24 corresponde a un 5% de tolerancia.
- E48 corresponde a un 2% de tolerancia.
- E96 corresponde a un 1% de tolerancia.
- E192 corresponde a tolerancias muy altas como 0,5%; 0,25%, 0,1%; etc.

Teniendo esto en cuenta, la selección final de  $R_E$  es de  $50,1 \Omega$  con una tolerancia aceptable del 5%. En la ecuación 6.3, introduciendo el valor de  $R_E$ , podemos ver que la corriente del LED ahora es de  $37,94 \text{ mA}$  que es un valor válido y nos proporciona una potencia elevada emitida por el dispositivo.

$$I_{LED} = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} = \frac{2,5 - 0,6}{50,1} = 37,92 \text{ mA} \quad (6.7)$$

con  $I_{LED} \in [36,12 \text{ mA}, 39,92 \text{ mA}]$  teniendo en cuenta el rango de tolerancias en  $R_E$  especificado. Una vez que hemos decidido todos los componentes, hacemos una última comprobación. Debemos asegurar el correcto funcionamiento del transistor, es decir, que su región de funcionamiento sea la región activa. Para esto, vamos a asegurar que el voltaje del colector y emisor en la región activa sea mayor al de saturación que corresponde a  $0,2 \text{ V}$ . Aplicamos la Ley de Voltaje de Kirchhoff de nuevo a la rama en la que se encuentran el emisor y el colector para decir que:

$$V_{CC} = V_{LED} + V_{CE} + R_E \cdot I_{LED} \quad (6.8)$$

donde  $V_{LED}$  es la caída de tensión del LED; un dato dado por el fabricante y corresponde a  $2 \text{ V}$ .

Despejando  $V_{CE}$  de la ecuación 6.8, podemos ver que, efectivamente, el voltaje entre el colector y el emisor del transistor de este diseño, es mayor que el de saturación de  $0,2 \text{ V}$ .

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{LED} - R_E \cdot I_{LED} = 1,1 \text{ V} > 0,2 \text{ V} \quad (6.9)$$

El circuito definitivo se muestra en la figura 38.

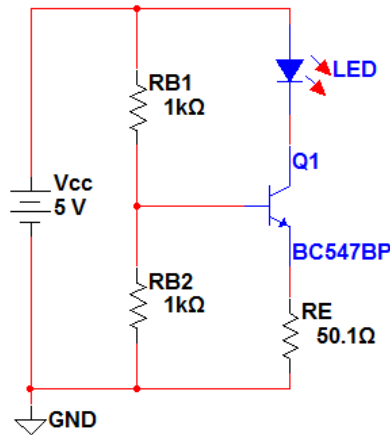


Figura 38: Circuito con valores del driver emisor

Por otro lado, también podemos establecer la  $R_E$  máxima que nos garantiza que el transistor se encuentre en región activa, que nos será útil a la hora de caracterizar el LED. Despejando  $R_E$  de la ecuación 6.8 que acabamos de ver, obtenemos:

$$R_{E \max} = \frac{V_{CC} - V_{LED} - V_{BE}}{I_{LED}} = \frac{5 - 2 - 0,2}{40 \cdot 10^{-3}} = 70 \Omega \quad (6.10)$$

Como podemos ver, el valor de la resistencia va a depender de la condición de diseño establecida para  $I_{LED}$ . En este caso hemos utilizado el valor más crítico de la corriente del LED, que corresponde a 40 mA, la máxima que puede soportar. En el caso de que la corriente no sea el valor crítico y sea un valor medio, el valor será:

$$R_{E\max} = \frac{V_{CC} - V_{LED} - V_{BE}}{I_{LED}} = \frac{5 - 2 - 0,2}{20 \cdot 10^{-3}} = 140 \Omega \quad (6.11)$$

#### 6.1.2.1. MODULACIÓN ANALÓGICA

Para la posible modulación analógica, hay que decidir la frecuencia de corte que se necesita ya que a partir de esta decisión, podemos dar valores a la resistencia  $R_G$  y el condensador  $C$ .

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{eq}C} \quad (6.12)$$

Para poder obtener la resistencia equivalente, pasaremos a mostrar el circuito propuesto en pequeña señal, quedando la figura 39.

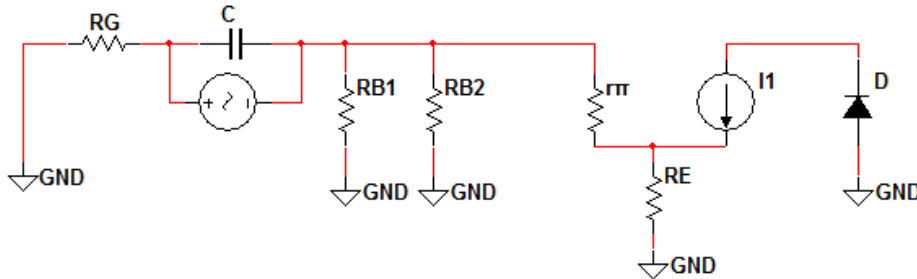


Figura 39: Circuito en pequeña señal anulando las fuentes de tensión

Para poder obtener la resistencia equivalente, vamos a anular todas las fuentes de tensión e intentar reducir el circuito en pequeña señal. Para empezar, obtenemos la resistencia equivalente de  $R_E$ , teniendo en cuenta que le llegan dos intensidades procedentes de la fuente de corriente y  $r_\pi$ . La intensidad que recorre el emisor del transistor es por tanto:

$$I_E = (1 + \beta) \cdot I_b \quad (6.13)$$

Por otro lado, aplicando la ley de Ohm, sabemos la tensión que cae en la resistencia  $R_E$ :

$$V_{R_E} = R_E \cdot I_E \quad (6.14)$$

Juntando las ecuaciones 6.13 y 6.14, la resistencia equivalente es:

$$R'_E = (1 + \beta) \cdot R_E \quad (6.15)$$

Ahora podemos considerar que  $R_E$  y  $R_\pi$  están en serie, y por tanto la resistencia equivalente es:

$$r'_\pi = R'_E + r_\pi = (1 + \beta)R_E + r_\pi \quad (6.16)$$

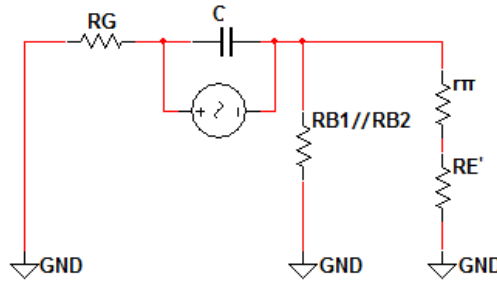


Figura 40: Circuito en pequeña señal anulando las fuentes de tensión reducido

Ahora es mucho más intuitivo decir cuál es la resistencia equivalente:

$$\frac{V_X}{I_X} = R_{eq} = R_G + R_{B1} // R_{B2} // r'_\pi \quad (6.17)$$

$$R_{eq} = R_G + \frac{1}{\frac{1}{R_{B1}} + \frac{1}{R_{B2}} + \frac{1}{(1 + \beta)R_E + r_\pi}} \quad (6.18)$$

En la ecuación 6.18, todos los términos son conocidos excepto  $R_G$  que es la que tenemos que establecer según la frecuencia de corte. Por esto, podemos formular la ecuación 6.19:

$$R_{eq} = R_G + R \quad (6.19)$$

donde:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_{B1}} + \frac{1}{R_{B2}} + \frac{1}{(1 + \beta)R_E + r_\pi}}$$

En conclusión, una vez que decidamos la frecuencia de corte necesaria para la modulación analógica, podemos combinar  $R_G$  y  $C$  para conseguirla ya que  $f_c$  depende de estos factores:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{eq} C} = \frac{1}{2\pi (R_G + R) C} \quad (6.20)$$

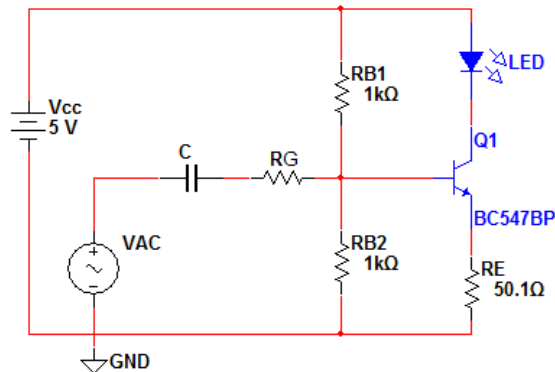


Figura 41: Driver emisor con valores y posibilidad de modulación

### 6.1.3. CARACTERIZACIÓN ELECTRÓNICA

En esta subsección del documento, trataremos de establecer una relación entre la resistencia  $R_E$  y la intensidad del LED ya que, como hemos visto anteriormente en la ecuación 6.3, la intensidad que atraviesa el LED viene fijada por la resistencia en el emisor del transistor. Modificando esta resistencia, modificamos directamente la intensidad del LED. Para hacer la caracterización, debemos recordar que la  $R_E$  no puede ser inferior a los 47,5  $\Omega$  calculados, ya que en este caso, la intensidad sería superior a 40 mA y podría averiar el emisor. Por otro lado, la  $R_E$  máxima que podemos situar será cuando el transistor deje de estar en la región activa.

#### 6.1.3.1. SIMULACIONES

Antes de ver los resultados experimentales en el laboratorio, debemos simular el circuito propuesto para tener una noción de lo que podemos esperar. Para ello usaremos el programa de simulación llamado Multisim, desarrollado por National Instruments. National Instruments es una empresa fundada en 1976 que comenzó trabajando en productos relacionados con GPIB, General Purpose Instrumentation Bus. Se trata de un bus de datos digital de corto rango desarrollado por Hewlett-Packard en los años 1970 para conectar dispositivos de testeo y medición con dispositivos de control. En la década de los 80, crearon LabVIEW que es su principal producto. Desde entonces la empresa se dedica al desarrollo y venta de productos de software, hardware y servicios. Sus mercados tradicionales son los campos de adquisición de datos, control de instrumentos e instrumentación virtual. Electronics Workbench es una empresa auxiliar de National Instruments que produce Multisim, un programa de diseño y análisis de circuitos electrónicos. Es un entorno de simulación SPICE estándar en la industria que permite generar simulaciones básicas AC y transitoria hasta simulaciones avanzadas de ruido y barridos de parámetros [Multisim].

A continuación, en la figura 42, podemos ver el circuito simulado con esta herramienta.

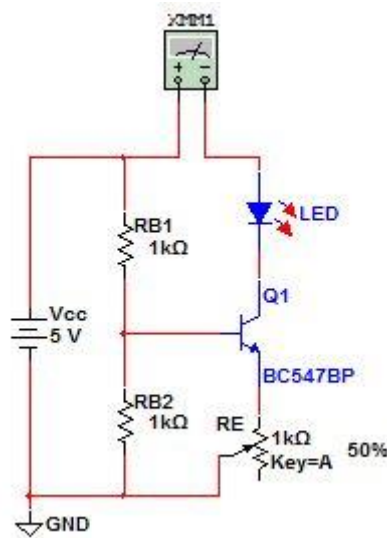
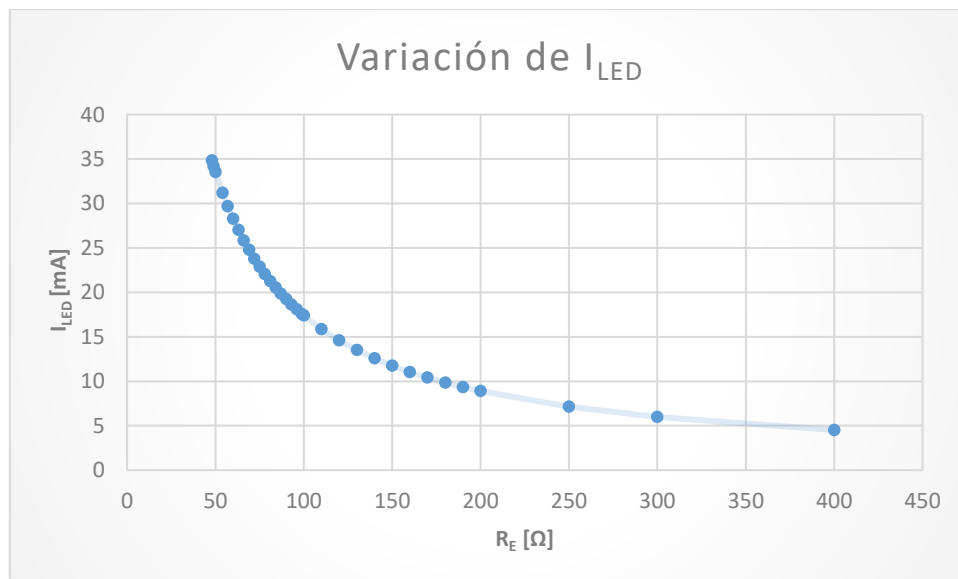


Figura 42: Circuito de simulación en Multisim

En la gráfica 1, podemos ver los valores de  $I_{LED}$  obtenidos según variábamos el valor de la resistencia. Podemos ver claramente la relación que siguen los datos obtenidos: a medida que aumenta  $R_E$ , decrece la intensidad. Esto en el laboratorio se podrá observar ya que la potencia del LED irá disminuyendo.



Gráfica 1: Variación de  $I_{LED}$  según  $R_E$  obtenida con Multisim

### 6.1.3.2. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Ahora que sabemos lo que podemos esperar en el laboratorio, es hora de comenzar las pruebas experimentales. Como hemos comentado, todas las resistencias tienen un porcentaje de tolerancia que nos indica, en tanto por ciento, cuánto puede variar el valor del componente. Nos indica un rango máximo y mínimo establecido por el fabricante. Por este motivo, las resistencias usadas en el circuito, fueron medidas para saber su valor exacto. En la figura 43 podemos ver el circuito con todos sus valores reales empleado para las comprobaciones empíricas.

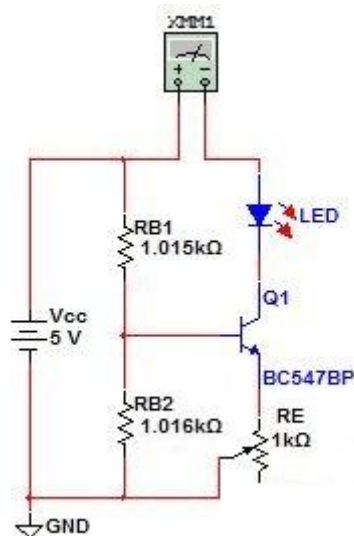
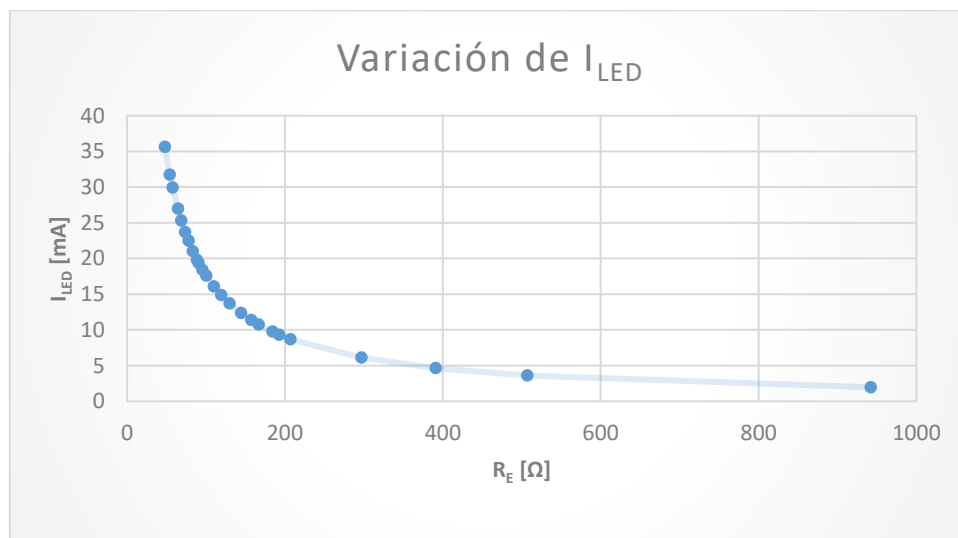


Figura 43: Circuito con valores reales dibujado con Multisim

Por otro lado, en la gráfica 2 podemos los valores obtenidos de la intensidad del LED según variábamos el valor de la resistencia con el potenciómetro de 1 kΩ.

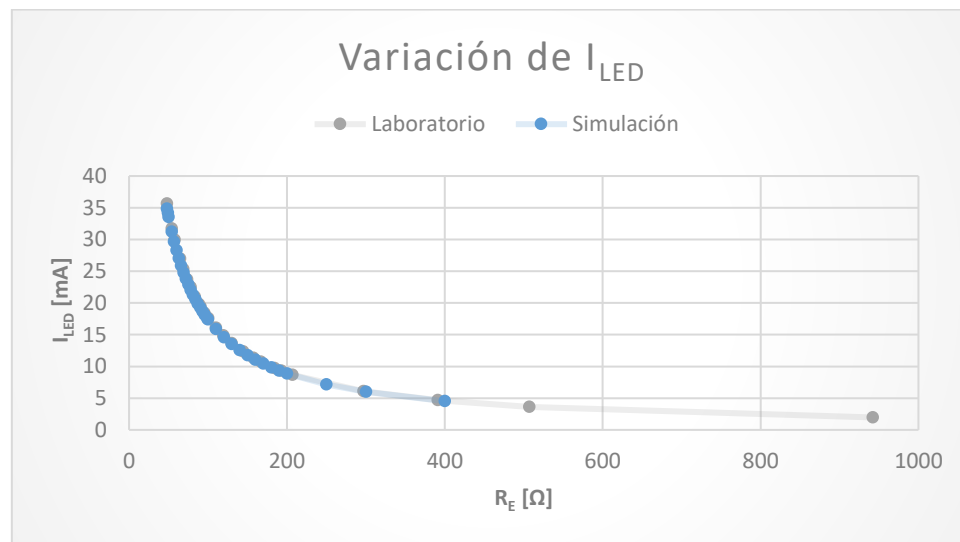


Gráfica 2: Variación de  $I_{LED}$  según  $R_E$  obtenida empíricamente



### 6.1.3.3. CONCLUSIONES

Los resultados de esta prueba son satisfactorios ya que coinciden a la perfección los datos simulados con los obtenidos en el laboratorio. La curva que describe la variación de intensidad es exponencial; la corriente disminuye a medida que aumentamos  $R_E$ .



Gráfica 3: Comparación de la variación de  $I_{LED}$  de los datos simulados y los empíricos

Como hemos dicho anteriormente, la resistencia que hace que la corriente que atraviesa el LED sea nula, y que por tanto deje de lucir, debería ser de resistencia infinita. En el laboratorio hemos podido comprobar que poniendo una resistencia ridículamente alta, de 20 k $\Omega$ , conseguimos que el LED deje de lucir.

### 6.1.4. CARACTERIZACIÓN ÓPTICA

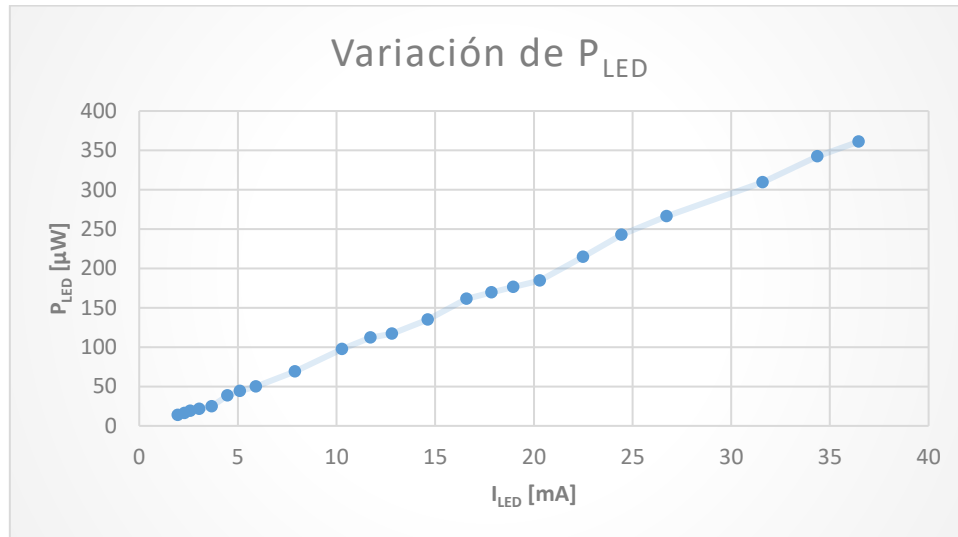
Como se ha comentado anteriormente, la potencia óptica del LED varía desde los 250  $\mu W$  hasta los 425  $\mu W$ , dependiendo de la corriente que lo atraviesa. Para una corriente de polarización directa de 20mA se indica 325  $\mu W$  como valor típico de potencia óptica de salida. Para poder obtener una relación entre la corriente y la potencia emitida del LED, realizaremos una caracterización del emisor que vamos a usar; el IF-E97. Según el componente, aun siendo del mismo modelo, podría tener una respuesta distinta. Esto se debe a que durante el proceso de fabricación, algunas características podrían cambiar y hacer que tenga una respuesta ligeramente distinta a la establecida por el fabricante. Además hay numerosos factores del ambiente que harán que la luz emitida por el LED no sea ideal. Para estudiar la potencia emitida por el LED y posteriormente, la recibida por el fotodiodo, trataremos de crear unas condiciones cuasi ideales. Es decir, trataremos de reducir al mínimo el recorrido de la luz para reducir las pérdidas.

A medida que variamos la resistencia  $R_E$ , variamos la corriente que atraviesa el LED y por tanto, la potencia óptica que emite. Esta potencia la hemos medido directamente usando un medidor de potencia óptica de Thorlabs modelo PM20 que tiene un rango espectral que va de los 400 a los 1100 nm. Thorlabs es una empresa privada, especializada en el diseño, fabricación y distribución de equipos ópticos. Entre otras áreas, se especializan en fibra óptica, láseres, instrumentación óptica, optomecánica, fotónica, y el aislamiento de vibraciones [ThorLabs]. Aunque se ha tratado que el haz de luz incida plenamente en el detector del aparato de medida, el acople no era perfecto ya que el sensor tiene unas dimensiones tan pequeñas como de  $3,6 \text{ mm}^2$  y cada medida ha sido tomada de manera distinta. El mecanismo de medida se puede ver reflejado en la figura 44.



Figura 44: Mecanismo de medición de potencia óptica del LED IF-E97

Los valores finales, por tanto, podrían variar ligeramente con respecto a la potencia real emitida. Los datos obtenidos se pueden ver a continuación en la gráfica 4.



Gráfica 4: Valores de potencia óptica emitida del LED obtenidos con un medidor de potencia óptica

Como podemos ver, la gráfica 4 sigue una línea que indica que a medida que va aumentando la intensidad, también lo hace la potencia óptica emitida. Como hemos dicho, el instrumento de medida no tenía acople y se tenía que acercar manualmente el medidor al LED. Las medidas por tanto, podrían no estar tomadas con la incidencia máxima y podría afectar a la potencia medida. Aun teniendo esto en cuenta, los resultados son aceptables ya que las medidas siguen una curva en la que la potencia crece proporcionalmente a medida que lo hace la intensidad. Estas medidas son importantes ya que ahora se tiene una estimación de rango de la potencia emitida por el LED. Cuando el sistema este completado, al ver la potencia recibida podremos hacer un estudio de las pérdidas reales.

Para cálculos posteriores debemos decir, que para el driver emisor diseñado, con una  $R_E$  de 50,1  $\Omega$ , la potencia medida es de 352,7  $\mu$ W.

## 6.2. DRIVER RECEPTOR

Como hemos dicho anteriormente, el fotodiodo usado en este proyecto será uno adaptado para el uso de fibra óptica de plástico del fabricante Industrial Fiber Optics. Entre su extensa oferta de fotodetectores, el llamado IF-D91 corresponde con un fotodiodo de tipo PIN y es el dispositivo seleccionado para nuestra aplicación.

### 6.2.1. CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO PROPUESTO: DRIVER RECEPTOR

Ahora debemos pensar en el diseño de la placa driver del receptor. Igual que para el diseño de la etapa de acondicionamiento del LED, consistirá en la elección de componentes, acompañada de una justificación. Según la intensidad eléctrica que atraviesa el LED, éste emitirá una potencia óptica que será la que se inyectará al esquema de sensor óptico por intensidad propuesto. Puesto que las potencias de emisión del LED son del orden de cientos/decenas de  $\mu\text{W}$ , la fotocorriente generada por el fotodetector es una intensidad del orden de  $\mu\text{A}$ , atendiendo a su parámetro de responsividad típico a 660 nm de  $\mathcal{R}(\text{A/W}) = 0.21 \text{ A/W}$  aproximadamente. Es por ello que habitualmente se diseñan circuitos de acondicionamiento en el driver receptor que incluyan una etapa de amplificación incorporada; amplificador de transimpedancia (basados en amplificadores operacionales).

El amplificador operacional es un circuito integrado que contiene varias etapas de transistores interconectados de manera que el conjunto puede amplificar señales. Es un componente muy versátil usado en numerosos campos, los modelos necesarios para analizar su comportamiento son muy sencillos y, en la gran mayoría de los casos, se puede asumir un comportamiento ideal.

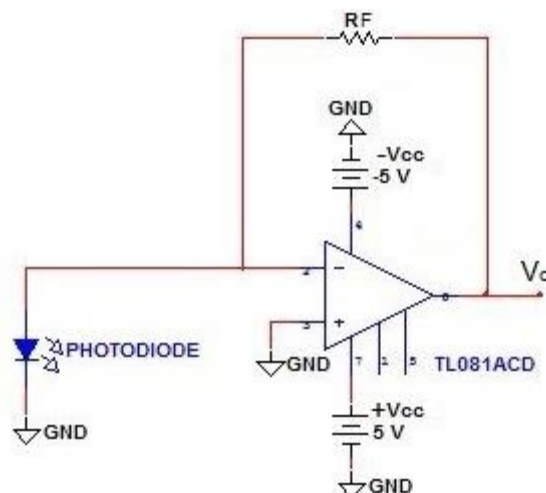


Figura 45: Circuito sin valores del driver receptor

La figura 45 nos muestra el circuito electrónico propuesto que consta de una etapa de amplificación de transimpedancia. Nos proporciona un amplio ancho de banda y una ganancia

alta que viene relacionada directamente con  $R_F$ , pero en contraposición, al tener baja impedancia de entrada, el sistema es ruidoso. Modificando la resistencia de la realimentación negativa modificamos el voltaje a la salida,  $V_O$ .

Tenemos que tener en cuenta que el amplificador operacional está siendo alimentado a -5 V y +5 V y si ponemos un valor de resistencia muy elevado, la señal de salida quedará recortada debido a la saturación. Un amplificador operacional no puede suministrar más de la tensión a la que se alimenta, normalmente el nivel de saturación es del orden del 90% del valor con que se alimenta. Cuando se da este valor se dice que satura, pues ya no está amplificando.

Se ha elegido trabajar con el amplificador operacional TL081, extensamente usado en instrumentación electrónica, por varias razones. Se puede llegar a alimentar con un voltaje de  $\pm 15V$  por lo que cumple con creces la alimentación que va a ser usada. El ancho de banda de este amplificador operacional es muy amplio, el cual permite trabajar hasta los 4 MHz. Por otro lado, también nos permite considerar el circuito como un circuito ideal porque su impedancia de entrada es muy grande. La resistencia de entrada que nos marca la hoja de características es del orden de teraohmios lo que nos permite decir que entre las entradas del amplificador operacional, no circula corriente. Otra ventaja es que la corriente de polarización es muy pequeña, del orden de pico faradios. Todas estas características y su bajo coste, hacen que el amplificador operacional TL081, sea una buena opción para este proyecto [TL081].

Aproximando las características al modelo ideal, se facilitan los cálculos. Si existe realimentación negativa, se puede considerar que el voltaje en la entrada negativa del amplificador,  $V^-$ , es la misma a la de la entrada positiva,  $V^+$ . Decimos que existe un cortocircuito virtual entre ambas entradas ya que entre ellas no circula corriente. Aplicamos la ley de Ohm y obtenemos la ecuación 6.21:

$$V_O = -I_{FD} \cdot R_F \quad (6.21)$$

donde:

- $V_O$  es el voltaje a la salida de la etapa de amplificación.
- $R_F$  es la resistencia en la realimentación negativa.
- $I_{FD}$  es la intensidad dada por el fotodiodo (fotocorriente) que varía según la ecuación 6.22:

$$I_{FD} = \mathcal{R} \cdot P_{LED \text{ recibida}} \quad (6.22)$$

donde  $\mathcal{R}$  corresponde a la responsividad del fotodiodo que es de  $0,4 \mu A/\mu W$  trabajando con una longitud de onda de 880 nm, según la hoja de características del fabricante, correspondiente al valor máximo de responsividad proporcionado por éste dispositivo. Teniendo en cuenta la gráfica de la responsividad (ver figura 33), el empleo de la longitud de onda de 660nm proporcionada por el LED implica una  $\mathcal{R} = 0,53 \cdot 0,4 = 0,21 \mu A/\mu W$ .

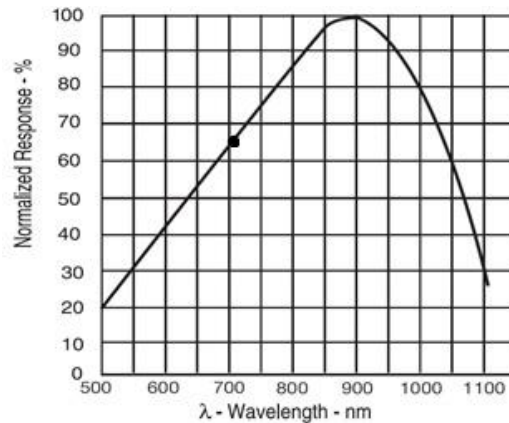


Figura 33: Respuesta del fotodiodo según la longitud de onda incidente [Anexo 2].

$P_{LED \text{ recibida}}$  es la potencia óptica emitida por el LED que recibe el fotodiodo. Como podemos ver en la hoja de características, el IF-E97 nos puede proporcionar una potencia óptica de entre 325  $\mu\text{W}$  y 425  $\mu\text{W}$  alimentado a 20 mA. Contamos con la ventaja de que en el capítulo del driver emisor, hicimos una caracterización del LED, por lo que sabemos con seguridad que con el circuito diseñado, la potencia óptica será alrededor de 352,7  $\mu\text{W}$ , para esta corriente de polarización diseñada. Como hemos explicado en capítulos anteriores, existen pérdidas de potencia óptica en el camino recorrido por el haz de luz por lo que la potencia emitida por el LED es distinta a la que recibe el fotodiodo. Debemos hacer un estudio de las pérdidas presentes tener una idea de la potencia óptica que podemos esperar en la etapa de recepción.

Hemos de recordar que el haz de luz emitido por el LED será transmitido por una fibra óptica de plástico, fibra emisora. Al final de ésta reflejará sobre un decodificador de escala de grises que reducirá significativamente la potencia transmitida. De nuevo, la luz recorrerá la fibra receptora hasta llegar al fotodiodo. Por último, como acabamos de ver, la respuesta del fotodiodo depende de la responsividad,  $\mathcal{R}$ . En este camino también hay que tener en cuenta las pérdidas de potencia óptica por los acoples de la fibra en los dispositivos ópticos. No sabemos el orden de magnitud de la potencia que cabría esperar en la etapa de recepción, por lo que en este capítulo, asumiremos cierta cantidad de pérdidas ópticas, para diseñar un primer driver receptor. La disminución más pronunciada de potencia óptica, se da en la reflexión; donde el haz de luz, sale de la fibra óptica de plástico y refleja en el encoder. Estas pérdidas son sumamente altas y se podría perder más de la mitad de la potencia emitida por el LED.

Ppérdidas [dB]	Pprecibida [ $\mu\text{W}$ ]	IPD [ $\mu\text{A}$ ]
3	176,77	37,12
5	111,53	23,42
8	55,90	11,74
10	35,27	7,40
12	22,25	4,67

Tabla 1:  $I_{PD}$  según las posibles pérdidas presentes en el camino del haz de luz

En la tabla 1 podemos ver la potencia óptica recibida por el fotodiodo para posibles pérdidas en el enlace óptico de 3dB, 5 dB, 8dB, 10 dB y 12 dB para ver en cada caso, la corriente que generará el fotodetector. Esta corriente se ha calculado a partir de la ecuación 6.23 que acabamos de ver, sabiendo la potencia recibida en el fotodetector. Por otro lado, la potencia recibida en el detector se ha calculado mediante la fórmula 6.23:

$$P_{p\acute{e}rdidas} = 10 \cdot \log \left( \frac{P_{emitida}}{P_{recibida}} \right) \quad (6.23)$$

donde:

- $P_{p\acute{e}rdidas}$  es la potencia, en dB, que hemos asumido que se perderá en el recorrido del haz de luz.
- $P_{emitida}$  es la potencia emitida por el LED que corresponde a 352,7  $\mu$ W.
- $P_{recibida}$  es la potencia, en  $\mu$ W, que cabría esperar en el fotodetector.

De la ecuación 6.23, obtenemos que:

$$P_{recibida} = \frac{P_{emitida}}{10^{\frac{P_{p\acute{e}rdidas}}{10}}} \quad (6.24)$$

Una vez que tenemos un valor aproximado de la intensidad que nos puede proporcionar el fotodiodo, procedemos a darle un valor a la resistencia en la realimentación. Posteriormente, una vez que tengamos el sistema completamente implementado en el laboratorio, podremos variar esta resistencia. Despejando  $R_F$  de la ecuación 6.25 obtenemos que:

$$R_F = \frac{-V_o}{I_{PD}} \quad (6.25)$$

donde  $V_o$  es el voltaje a la salida del circuito. Como debemos recordar, la placa de Arduino trabaja de 0 a 5V por lo que para la salida deberá 5V como máximo para no quedar saturada.

$I_{PD}$  corresponde a la corriente proporcionada por el fotodiodo, provocada por la potencia óptica que le llega del LED.

<b>P<sub>pérdidas</sub> [<math>\mu</math>W]</b>	<b>R<sub>F</sub> [k<math>\Omega</math>]</b>	<b>R<sub>F</sub> EIA [k<math>\Omega</math>]</b>	<b>Tolerancia [%]</b>
3	134,69	133	2
5	213,474	200	5
8	425,937	422	2
10	675,064	649	2
12	1069,905	1050	2

Tabla 2:  $R_F$  según las pérdidas estimadas en el camino del haz de luz

La tabla 2 nos indica el orden de magnitud que podría tener  $R_F$  en diferentes casos, dependiendo de las pérdidas de potencia óptica consideradas. Adicionalmente, debemos elegir uno de los valores estándar de las resistencias, conocidos como valores preferentes, establecidos por la

EIA. Tras comprobar de nuevo tabla de la imagen 37, podemos concluir los valores de  $R_F$  que podemos utilizar realmente. El trabajo en el laboratorio sobre el montaje final es concluir una resistencia aceptable, según las pérdidas reales que nos encontremos. Los detalles de la implementación del sistema se explicarán más adelante pero por ahora podemos decir que las pérdidas reales fueron mayores que las previstas e incluso asumiendo el peor caso y usando una  $R_F$  de  $1,05 \text{ M}\Omega$ , la salida del driver emisor era casi nulo. Se optó por usar una resistencia variable, de  $5 \text{ M}\Omega$ , en la realimentación hasta obtener un voltaje lo suficientemente grande como para poder ser medido. Adicionalmente, como un primer aproximamiento, se hizo reflejar la luz sobre un espejo con el que la reflexión es óptima. Mientras se variaba el potenciómetro, se midió el voltaje a la salida,  $V_o$ , cuyos resultados se pueden ver en la tabla 3.

$R_F [\text{M}\Omega]$	$V_o [\text{mV}]$
0,74	-0,56
1,05	-0,75
1,25	-0,94
1,67	-1,13
1,75	-1,31
2,10	-1,50
2,27	-1,69
2,55	-1,88
2,72	-2,06
3,07	-2,27
3,28	-2,44
3,60	-2,63
3,82	-2,81
4,04	-3,00
4,33	-3,19
4,59	-3,37
4,77	-3,44
4,89	-3,46

Tabla 3: Resultados de  $V_o$  según  $R_F$

Como podemos ver en la tabla 3, entre los  $4 \text{ M}\Omega$  y los  $5 \text{ M}\Omega$  se obtiene una salida lo suficientemente grande como para poder ser medida. Además, tenemos que tener en cuenta que, una vez implementado el sistema, la luz no reflejará sobre un espejo, sino que reflejará en otra superficie que absorberá parte de la luz incidente y el voltaje final será menor. Tras comprobar los valores establecidos por la EIA en la imagen 37, concluimos que usaremos una  $R_F$  de  $4,7 \text{ M}\Omega$  con una tolerancia aceptable del 5%. El circuito final empleado se puede ver en la figura 46. Al establecer esta  $R_F$  se obtuvo un voltaje de  $-3,42 \text{ V}$ .



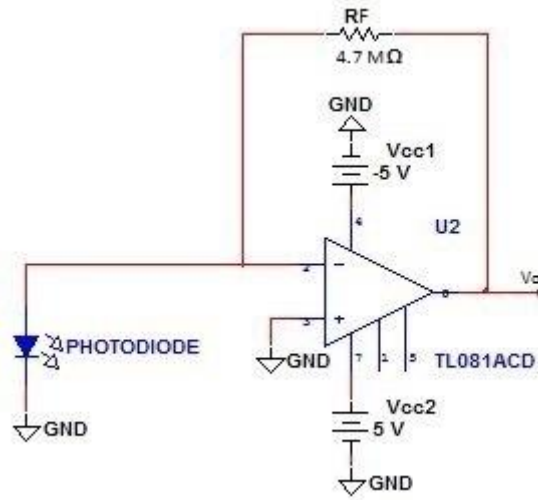


Figura 46: Circuito con valores del driver receptor

Una vez llegados a este punto, podemos hacer un cálculo de las pérdidas reales presentes en el sistema. Para ello primero tenemos que saber la intensidad que proporciona el fotodiodo, que podemos calcular gracias a la ecuación 6.26. Cabría destacar que, por la tolerancia de las resistencias, el valor real de la  $R_F$  empleada es de  $4,58 \text{ M}\Omega$ .

$$I_{PD} = \frac{-V_o}{R_F} = \frac{3,42}{4,58 \cdot 10^6} = 0,747 \mu\text{A} \quad (6.26)$$

A partir de la intensidad, sabemos la potencia óptica que ha llegado al fotodiodo ya que están relacionadas según la ecuación 6.27. Como hemos visto la responsividad del fotodiodo es  $\mathcal{R} = 0,21 \mu\text{A}/\mu\text{W}$ .

$$P_{recibida} = \frac{I_{PD}}{\mathcal{R}} = \frac{0,72}{0,21} = 3,55 \mu\text{W} \quad (6.27)$$

Como hemos visto antes en la ecuación 6.24, podemos saber las pérdidas totales en decibelios. Hay que recordar que la potencia emitida por el LED es conocida y corresponde a  $352,7 \mu\text{W}$ . Con todo esto podemos concluir que las pérdidas totales ascienden a casi 20 dB.

$$P_{pérdidas} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{emitida}}{P_{recibida}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{352,7}{3,42}\right) = 19,96 \text{ dB} \quad (6.28)$$

Al realizar más medidas, nos dimos cuenta de la presencia de una onda sinusoidal, que podemos ver representada en la figura 47. Esta imagen del osciloscopio fue tomada durante una sesión de laboratorio. Como podemos ver, el periodo de la onda es de 10 ms aproximadamente, lo que corresponde a una frecuencia de 100 Hz ( $f=1/T$ ), que coincide aproximadamente con la frecuencia de la luz ambiente del laboratorio de las luces fluorescentes.

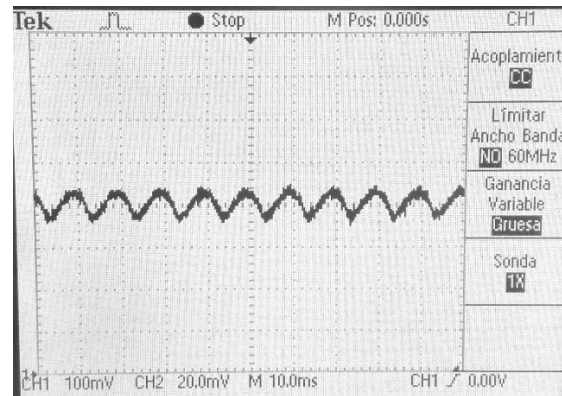


Figura 47: Onda sinusoidal acoplada a  $V_o'$  por la luz fluorescente del laboratorio

Este efecto se puede evitar modulando la luz. Como vimos en el capítulo 6.1.2.1. "Modulación Analógica", podemos implementar una etapa de acondicionamiento que module la luz emitida por el emisor. Después en la etapa de recepción habrá que diseñar un filtro paso alto que permita el paso de las frecuencias más altas y atenúe las frecuencias más bajas, el caso de la luz ambiente. La amplitud de esta onda depende de la superficie donde se da la reflexión y en nuestro caso no nos afecta para la aplicación final.

#### 6.2.1.1. ETAPA INVERSORA

Hay que tener en cuenta que la señal final será transmitida a una placa de Arduino la cual trabaja entre 0 y 5 V. En sus pines de entrada analógica, sólo podrá recibir un voltaje comprendido en este rango. En este punto del circuito vemos que la salida es negativa, lo cual se sale del rango de trabajo de la placa. Lo que debemos hacer es una etapa inversora que nos transforme el voltaje negativo en uno positivo. Adicionalmente, como el nivel de voltaje no es óptimo, incluiremos offset a través de la entrada positiva del amplificador para que la salida final  $V_o'$  aumente hasta un máximo de 5V. Este voltaje es  $V_{ref}$  reflejado en la figura 48.

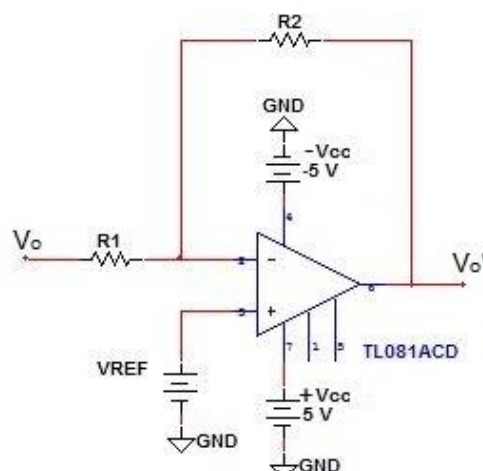


Figura 48: Etapa inversora sin valores del driver receptor

Para poder hacer cálculos sencillos, como hay realimentación negativa, podemos decir que el voltaje en la entrada negativa del amplificador,  $V^-$ , es la misma a la de la entrada positiva,  $V^+$ . Por eso podemos decir que  $V^-$  es cero. Aplicando la ley de nodos de Kirchhoff, podemos establecer la relación de la ecuación 6.29.

$$\frac{V_o - V_{ref}}{R_1} = \frac{V_{ref} - V_o'}{R_2} \quad (6.29)$$

$$V_o' = V_{ref} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_o \frac{R_2}{R_1} \quad (6.30)$$

Si queremos simplificar los cálculos y ser capaces de controlar fácilmente el voltaje de referencia, podemos establecer que  $R_1$  y  $R_2$  sean iguales con un valor de 1 kΩ. Adicionalmente,  $V_o$  nos da un valor negativo por lo que, al invertirlo será de misma magnitud pero de signo contrario. La salida final  $V_o'$  será, por tanto:

$$V_o' = 2V_{ref} + |V_o| \quad (6.31)$$

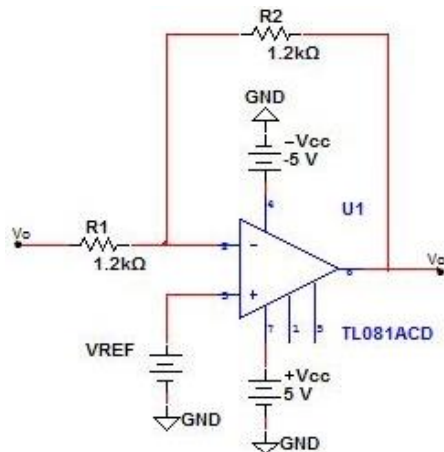


Figura 49: Circuito de la etapa inversora del driver receptor con valores

La siguiente figura 50, nos muestra el esquemático del circuito final del driver receptor.

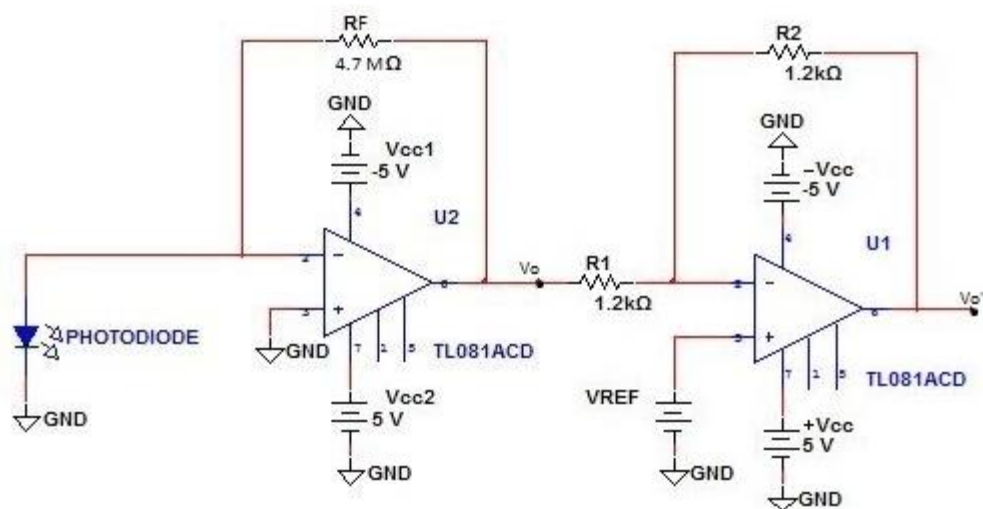
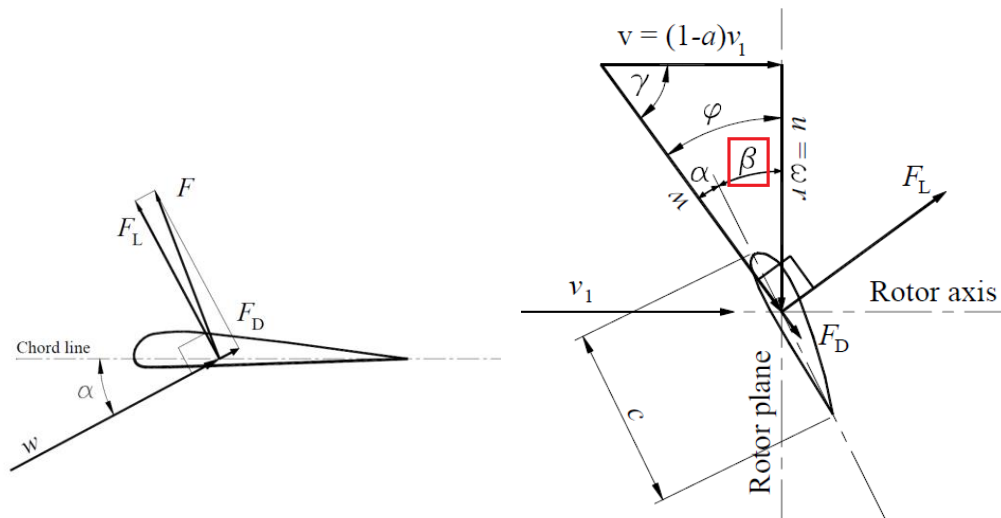


Figura 50: Circuito con valores del driver receptor

## CAPÍTULO 7: DISEÑO Y DESARROLLO DEL ENCODER ÓPTICO

El objetivo del proyecto es controlar dos parámetros críticos del comportamiento de un aerogenerador. Primero, controlaremos la velocidad de giro para evitar que llegue a velocidades muy altas, poniendo así en peligro la integridad de la turbina. Adicionalmente, a una determinada velocidad genera su potencia nominal, por lo que nos interesa mantener la turbina girando a esa velocidad. Esto se puede controlar mediante el ángulo de paso de las aspas. Mediante un buen diseño del codificador óptico, tenemos que ser capaces de determinar la velocidad de giro de un aerogenerador y a su vez el ángulo de paso de las mismas. Para ello, colocaremos un codificador que gire solidario al eje rápido de la turbina, el cual gira solidariamente con el eje de giro de las aspas, y haremos que el haz de luz emitido por el driver emisor del sensor óptico refleje sobre éste. La luz reflejada será absorbida por el extremo de la POF del driver receptor y nos dará un nivel de tensión a la salida. Para poder medir la frecuencia de los pulsos recibidos (y por tanto la velocidad de giro), colocaremos franjas negras con las que el voltaje en el driver receptor caerá drásticamente. Esta caída de tensión nos permitirá contar pulsos y así, la velocidad de rotación. Para simular la velocidad de rotación de un aerogenerador, se ha empleado un rodamiento sobre el cual se ha colocado la plantilla del encoder que vamos a ver a continuación. Por otro lado, para determinar el ángulo de paso de las aspas de aerogenerador, relacionaremos una tonalidad de gris a un ángulo de paso específico. Cada gris generará un voltaje distinto a la salida y asignaremos ese nivel de tensión a un ángulo de paso. Para simular el cambio de ángulo de las aspas de un aerogenerador, el rodamiento se ha movido horizontalmente.

Debido al alcance del proyecto, no nos podemos centrar en la mecánica ni en la aerodinámica de fluidos que hay detrás del funcionamiento de las aspas del aerogenerador. Aun así, valdría la pena explicar algunos conceptos importantes de manera superficial. En las aspas de un aerogenerador, existe el concepto de ángulo de ataque y ángulo de paso. En la figura de la izquierda de la figura 51, el ángulo de ataque,  $\alpha$ , corresponde al ángulo con el que incide el viento en la pala y está relacionado con la fuerza de sustentación ( $F_L$ ).



**Figura 51: Descripción del ángulo de ataque (izquierda) y ángulo de paso (derecha) de las aspas de un aerogenerador [Sø].**

Por otro lado, el ángulo de paso, representado en la figura de la derecha de la figura 51 como  $\beta$ , es el ángulo que forma el eje de la pala con el eje del rotor. Modificando este ángulo, de manera neumática o eléctrica, se cambia la resistencia al viento del aspa. Este ángulo depende de muchos factores y los procesos para calcularlo son difíciles. De todos los artículos de investigación que hemos estudiado, vemos que el ángulo de paso depende, entre otros, del ángulo de ataque,  $\alpha$  [Sø] [Mulj&Butt]. Para controlar la velocidad de rotación de la turbina del aerogenerador, el ángulo de paso suele variar entre los  $0^\circ$  y los  $30^\circ$ . En particular, cuando la velocidad del viento es muy elevada, existe un rango crítico entre los  $15^\circ$  y  $25^\circ$  en el que un pequeño cambio en el ángulo de paso, cambia drásticamente la velocidad de rotación de la turbina [Tokat] [Pvs.T]. En este proyecto trataremos de medir, con una precisión de  $1^\circ$ , el ángulo de paso de las aspas del aerogenerador. Para ello, tenemos que ser capaces de discernir la reflexión sobre diez tonalidades distintas de gris que van a estar relacionados con los  $10^\circ$  de diferencia de ese rango crítico. En la práctica, para poder relacionar el ángulo de paso con el encoder, podemos aprovechar el accionamiento neumático. Cuando el controlador mande a señal a los actuadores neumáticos para cambiar el ángulo de paso de las aspas, estos actuadores podrían también mover el encoder de manera que el haz de luz incida en el gris correspondiente a ese ángulo.

Teniendo en cuenta todo esto, la figura 52 representa las marcas con las que se ha codificado nuestro encoder óptico. Esta figura también incluye una leyenda con el nombre que usaremos a lo largo del proyecto de cada tonalidad de gris.

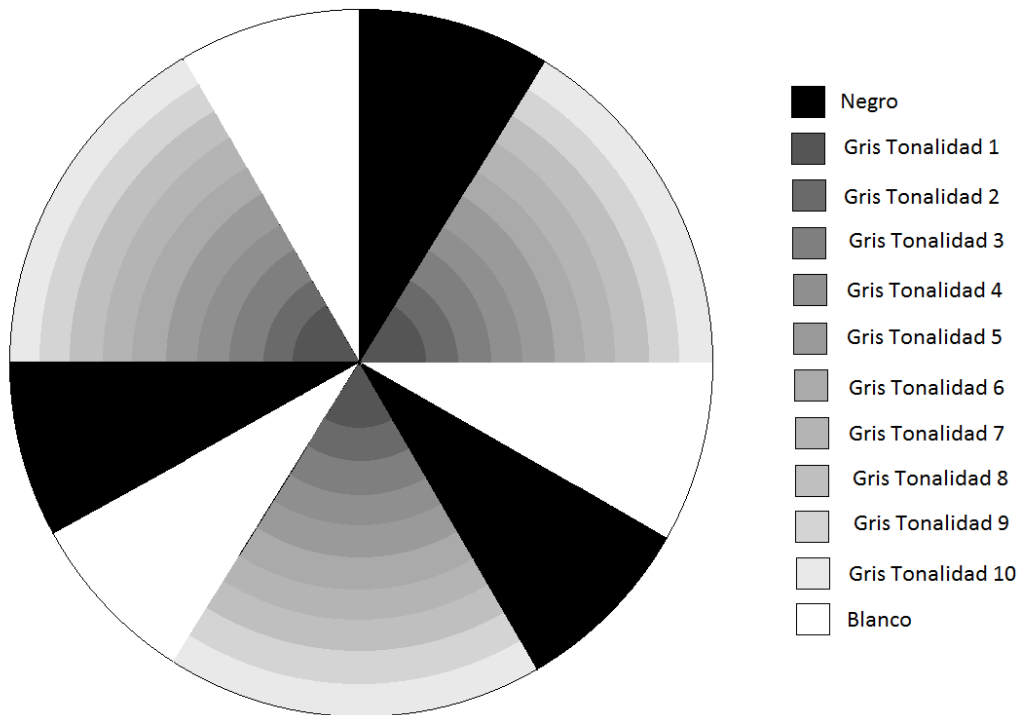


Figura 52: Marcas del codificador óptico diseñado y su respectiva leyenda

## 7.1. ESTUDIO DE LA REFLEXIÓN DE LA LUZ

En esta parte del proyecto, se estudiará el comportamiento de la luz ante la reflexión. Dependiendo de cómo incida la luz saliente de la fibra óptica sobre la superficie, al fotodetector le llegará más luz o menos. Adicionalmente, según el material de la superficie y el color de ésta, la reflexión puede variar. Para hacer los primeros estudios, se ha utilizado un espejo, con el que la reflexión es óptima, capaz de proporcionar reflexiones del 99% de la señal incidente, típicamente. Adicionalmente, para evitar pérdidas en la fibra, habrá que evitar doblarla. Según la distancia a la que se coloque la fibra óptica de la superficie de reflexión, el receptor recibirá más luz. Esta distancia tiene un punto en la que el voltaje recibido es máximo y después descendiende de nuevo. Para justificar que se trata de una gráfica cuasi-estándar de funcionamiento, incluimos la figura 53. En ésta podemos ver el comportamiento de la reflexión en función de la distancia de reflexión de un sensor reflexivo comercial llamado "TCRT5000".

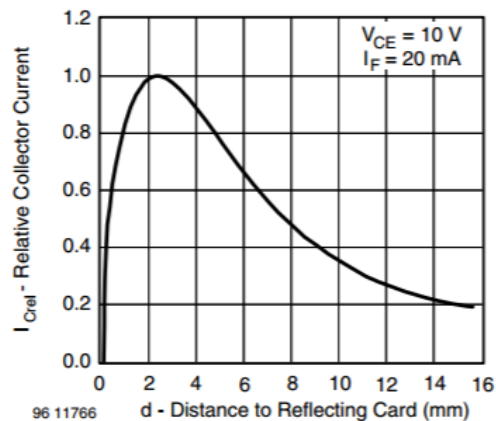
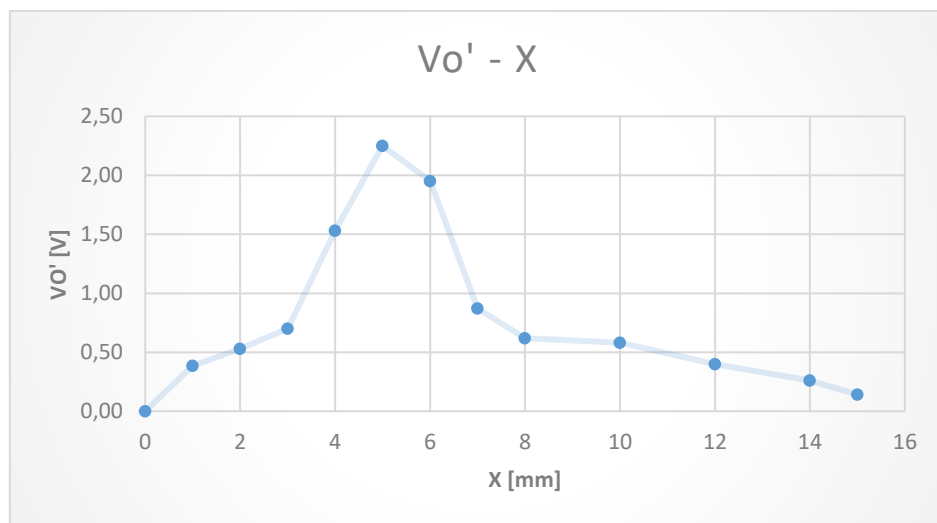


Figura 53: Gráfica cuasi-estándar de funcionamiento de reflexión en función de la distancia de reflexión [Anexo 4].

El proceso para medir esta distancia de reflexión máxima ha sido complicado. Se han colocado las dos fibras ópticas de plástico, la del emisor y la del receptor, una junto a la otra. El espejo se ha colocado en una superficie horizontal y las dos fibras, verticales a éste, de tal modo que la incidencia fuese máxima. Se ha utilizado un sistema de medición vertical y se ha ido moviendo las dos fibras a lo largo de éste. Se comenzó con una distancia cero del espejo y se fue aumentando milímetro a milímetro, midiendo el voltaje a la salida del driver emisor en todo momento. Los datos obtenidos se pueden ver en la gráfica 5 y son los resultantes de ir variando la altura de la fibra óptica, mientras medimos el voltaje obtenido a la salida del driver receptor:

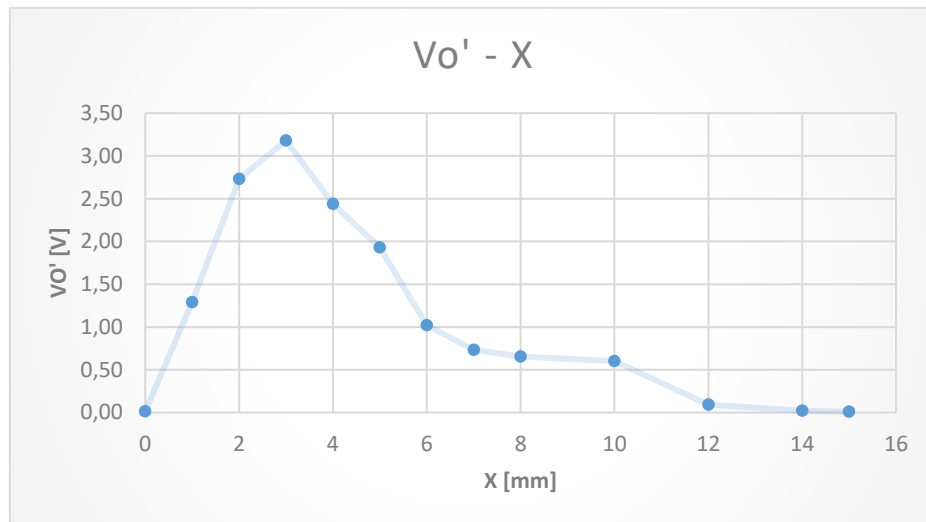


Gráfica 5: Vo' según la distancia a un espejo

Adicionalmente, según lo cerca que se encuentren las fibras entre sí, el resultado puede cambiar. Cuanto más juntas estén, más potencia reflejada se inyectará en la fibra receptora. Antes de empezar, cabría recordar que el núcleo de la fibra óptica es el medio en el que se transmite el haz de luz. El resto de componentes son recubrimientos que protegen el núcleo. Ambas fibras inciden verticalmente, por lo que el ángulo de reflexión es muy pequeño. La distancia dada por el recubrimiento que separa ambos núcleos hace que no toda la luz sea absorbida y se pierda

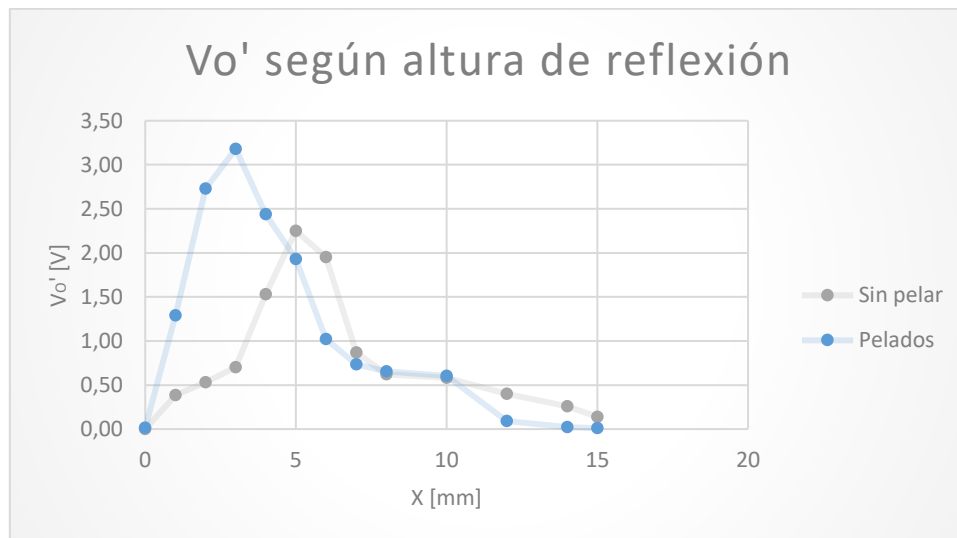


gran cantidad de potencia óptica en la reflexión. La fibra óptica de plástico que estamos utilizando tiene un recubrimiento grueso, por lo que si pelamos los extremos en los que se va a dar la reflexión, los núcleos estarán significativamente más cerca. Se ha utilizado el mismo método que antes y al ir variando la distancia de la superficie a las fibras ópticas se ha obtenido la siguiente gráfica:



Gráfica 6: Vo' según la distancia a un espejo con POF peladas

En la gráfica 6 vemos que el voltaje en el punto óptimo de reflexión es a una distancia de 3 mm y es capaz de captar 3,4 V. En el caso de usar fibra con los extremos sin pelar, el punto óptimo de reflexión es a una distancia de 5 mm, y la tensión final dada por el sensor es inferior a la anterior, 2,25V.



Gráfica 7: Comparación de Vo' según la distancia a un espejo con POF peladas y sin pelar

Por otro lado, podemos ver los datos comparados en la gráfica 7. Aquí vemos a simple vista que con los extremos de la fibra óptica pelados, se consigue una mejor potencia óptica recibida en

reflexión. Conseguimos que los núcleos estén más cerca el del emisor con el receptor y este último es capaz de absorber mejor la luz.

Ahora que sabemos cómo es el comportamiento de la luz ante reflexión, debemos pasar al estudio particular de la reflexión de la luz en nuestro encoder diseñado. La luz va a reflejar en una tonalidad de gris, la cual nos dará cierto valor de voltaje a la salida del receptor. En un futuro, el programa que diseñemos tendrá que ser capaz de relacionar cada tonalidad de gris con su rango de voltaje característico. Aunque hemos visto que, para una fibra óptica de plástico con los extremos pelados, la distancia que nos da el máximo voltaje posible es de 3 mm, debemos estudiar si existe una distancia de reflexión a la cual la diferencia de voltaje entre niveles de gris es grande. Esta diferencia tiene que ser lo suficientemente grande para que, si existe una fluctuación en la medida, la tensión característica de cada tonalidad, no solape con el voltaje característico de otra tonalidad. Al igual que en el caso anterior, haremos un estudio según la distancia de reflexión para cuatro niveles de gris distintos. Se colocaron dos fibras ópticas de plástico, la del emisor y la del receptor, una junto a la otra. La figura 54 nos muestra una plantilla con cuatro tonalidades de gris usada para este estudio y una pequeña leyenda que muestra el nombre de cada tipo de gris.

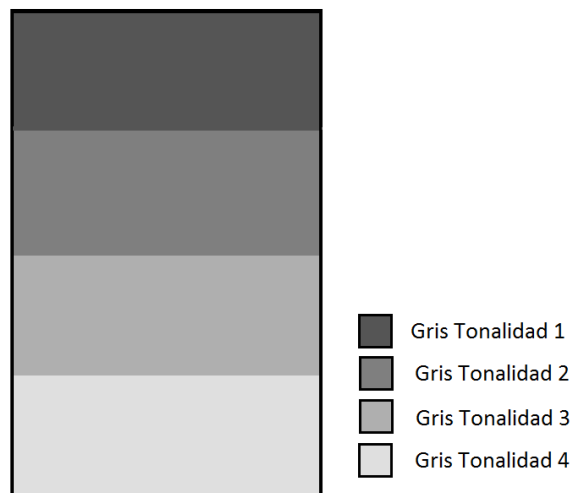
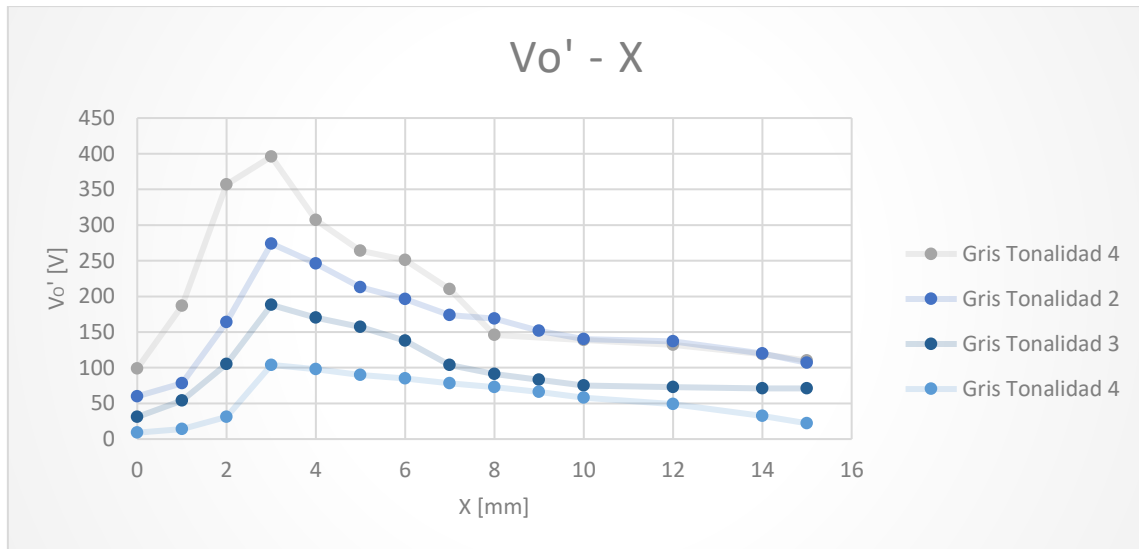


Figura 54: Plantilla con cuatro tonalidades de gris para el estudio de  $V_o'$  según la distancia de reflexión

Ésta plantilla se colocó en una superficie horizontal y las dos fibras, verticales a ésta, de tal forma que la incidencia fuese máxima. Se ha utilizado un sistema de medición vertical y se ha ido moviendo las dos fibras a lo largo de éste. Para cada tonalidad se comenzó con una distancia cero y se fue aumentando milímetro a milímetro, midiendo el voltaje a la salida del driver emisor en todo momento. Variando la altura de la fibra óptica, pudimos obtener los resultados obtenidos que se pueden ver reflejados en la gráfica 8:



Gráfica 8: Comparación de  $V_o'$  según la distancia de reflexión a la plantilla con cuatro tonalidades de gris

Como cabría esperar, la tonalidad más clara de gris, la tonalidad 4, nos proporciona mayor voltaje que el resto ya que este color es capaz de reflejar más luz. Al solapar los cuatro resultados en una misma gráfica vemos que, a ciertas distancias, el voltaje a la salida del driver receptor es prácticamente igual con lo que no seríamos capaces de saber con qué tonalidad estamos trabajando. En cambio hay puntos en los que el voltaje resultante es muy diferente entre dos niveles consecutivos de gris. Esta zona se concentra principalmente donde se da el mayor voltaje posible, entre los 2 y 4 mm, donde los resultados están muy separados entre sí.

En las siguientes gráficas iremos analizando el voltaje resultante de la reflexión para cada tonalidad de gris y también para cada distancia de reflexión (desde los extremos de la fibra a la plantilla usada para este estudio). En las siguientes tablas de datos podemos ver la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas en unidades de mV y este parámetro es el que nos va a indicar la distancia óptima de reflexión. A esta distancia óptima la diferencia de voltaje entre dos grises es mayor, lo cual da pie a que si existe un error en la media, el voltaje del sensor no se solapa con el voltaje característico del otro nivel de gris.

Distancia [mm] = 1

		Voltaje a la salida del driver emisor [mV]	Diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas [mV]
Tonalidad de gris	4	187	109
	3	78	
	2	54	24
	1	14	40

Tabla 4: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 1mm

A una distancia de 1mm las medidas son muy inestables. La curva del comportamiento de la luz ante reflexión asciende muy rápido y una pequeña variación de la distancia hace que el valor del voltaje sea muy diferente. En el primer caso, entre la tonalidad 4 y 3 de gris, hay una diferencia de más de 100 mV, lo cual nos daría mucha robustez a nuestro sistema. Sin embargo, en los siguientes niveles, la diferencia es muy pequeña y cualquier fluctuación en la medida haría que los niveles de tensión se solapasen dando lugar a que no seamos capaces de distinguir con claridad, según la tensión del driver emisor, en qué nivel de gris nos encontramos.

Distancia [mm] = 2

		Voltaje a la salida del driver emisor [mV]	Diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas [mV]
Tonalidad de gris	4	357	193
	3	164	
	2	105	59
	1	31	74

Tabla 5: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 2mm

En el caso de trabajar a una distancia de reflexión de 2 mm, los resultados dados por el sensor óptico son más estables y se podría trabajar mejor que en el caso anterior. Aun sabiendo esto, la diferencia de tensión de dos medidas de reflexión sobre distintas tonalidades de gris, sigue siendo poco homogénea ya que, para unos casos, la diferencia de tensión es grande, pero en otros no.

Distancia [mm] = 3

		Voltaje a la salida del driver emisor [mV]	Diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas [mV]
Tonalidad de gris	4	396	122
	3	274	
	2	188	86
	1	104	84

Tabla 6: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 3mm

Como hemos visto anteriormente, para una POF con los extremos pelados, a una distancia de 3 mm se produce una reflexión óptima que se traduce a un mayor nivel de tensión a la salida del driver emisor. A medida que nos vamos acercando a esta distancia, la diferencia de tensión entre tonalidades de gris es mayor.

Distancia [mm] = 4

		Voltaje a la salida del driver emisor [mV]	Diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas [mV]
Tonalidad de gris	4	307	61 76 72
	3	246	
	2	170	
	1	98	

Tabla 7: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 4mm

Al igual que en el caso anterior, la diferencia de tensión entre tonalidades de gris es muy parecida y lo suficientemente grande para que, si existe una fluctuación en la medida, la tensión característica de cada tonalidad, no solape con el voltaje característico de otra tonalidad.

Distancia [mm] = 5

		Voltaje a la salida del driver emisor [mV]	Diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas [mV]
Tonalidad de gris	4	264	51 56 67
	3	213	
	2	157	
	1	90	

Tabla 8: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 5mm

Al igual que en el caso anterior, la diferencia de tensión entre tonalidades de gris es muy parecida pero, llegados a este punto, la diferencia empieza a ser cada vez menos y tenemos menos margen de error.

Distancia [mm] = 6

		Voltaje a la salida del driver emisor [mV]	Diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas [mV]
Tonalidad de gris	4	251	55
	3	196	58
	2	138	53
	1	85	

Tabla 9: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 6mm

Como hemos dicho, a partir de los 5 mm, la diferencia de tensión entre tonalidades de gris es pequeña y se reduce a medida que aumentamos la distancia. En el presente documento técnico no se han incluido tablas comparativas del resto de distancias por ser datos triviales. En términos generales podemos decir que a medida que aumenta la distancia, la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas es la misma entre sí pero de magnitud menor comparada a la distancia anterior. Esto se puede ver reflejado en la gráfica 8 donde observamos que a partir de los 8 mm, las gráficas se solapan. A continuación podemos ver el caso de la distancia de reflexión de 10 mm en la que los niveles de voltaje están muy próximos entre sí, con diferencias casi imperceptibles de 2 mV, lo cual confirma lo anteriormente explicado.

Distancia [mm] = 10

		Voltaje a la salida del driver emisor [mV]	Diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas [mV]
Tonalidad de gris	4	142	2
	3	140	65
	2	75	17
	1	58	

Tabla 10: Comparación de la diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas para una distancia de reflexión de 10mm

Tras este estudio podemos concluir que la mayor diferencia de voltaje entre dos tonalidades consecutivas de gris se encuentra entre los 2 y 4 mm de reflexión. Aprovechando que a los 3 mm, el voltaje es máximo, la distancia de compromiso de nuestro sistema será de 3mm.

## 7.2. CARACTERIZACIÓN

Una vez que tenemos una idea del comportamiento de nuestro haz de luz en la reflexión, para poder diseñar un programa que discrimine las franjas negras y blancas, debemos saber el voltaje que le llegará a la placa de Arduino en cada caso. Recordemos que en esta parte del proyecto, la luz que emite el driver emisor reflejará en el encoder que diseñemos. El extremo de la fibra del driver receptor recogerá una cantidad de luz y dará una tensión a su salida que será medida por la placa Arduino a través de una de las cinco entradas analógicas que tiene. Más adelante entraremos en los detalles del código Arduino diseñado, pero para este capítulo, hay que mencionar que los datos que entran a la placa Arduino se envían a través del módulo Xbee mediante la función `Serial.println()`. En esta función, si la variable a representar es un número, cada dígito se representa con su carácter ASCII equivalente. En el caso de ser una variable de tipo float, se imprime con un máximo de dos decimales. Visto con un ejemplo, la función `Serial.println(1,23456)` enviará el valor 1,23. Una vez que sabemos esto, tenemos que ser capaces de discriminar cada nivel de gris teniendo en cuenta que vamos a poder medir con una precisión máxima de 10 mV (0,01 V).

Adicionalmente tenemos que tener en cuenta la onda correspondiente a la luz ambiente del laboratorio que se superpone al voltaje final. La frecuencia de esta onda es de 100 Hz ( $f=1/T$ ), que coincide con la frecuencia de las luces fluorescentes. La amplitud de esta onda depende de la superficie donde se da la reflexión ya es mayor en cuanto la reflexión es mejor. En nuestro caso, sólo se percibe en las tonalidades más claras de gris, donde la reflexión es mayor. En el resto de tonalidades no se percibe esta onda superpuesta. En la figura 47 podemos ver la tensión de salida del receptor ( $V_o'$ ) resultante de la reflexión sobre franja blanca del encoder diseñado que nos da el peor caso. En este caso, la amplitud de la onda es la mayor posible y corresponde a 40 mV. Una vez que sabemos esto, tenemos que ser capaces de discriminar cada nivel de gris teniendo en cuenta que tenemos que dejar 40 mV de diferencia en los rangos correspondientes a las tonalidades más claras de gris.

A continuación realizaremos la caracterización óptica del encoder diseñado, que se puede ver representado en la figura 52 mostrada al comienzo del capítulo, y relacionaremos un rango de voltaje a cada tonalidad de gris. Recordando que hemos establecido una distancia de compromiso de 3mm, hemos realizado una serie de mediciones, separadas 15 minutos entre sí, para asegurar continuidad y determinar el valor del voltaje que representa cada tonalidad de gris. La siguiente tabla nos muestra los voltajes, en mV, obtenidos en cada caso:

Negro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Blanco
103	216	264	350	404	451	485	528	620	704	784	912
90	215	257	330	395	434	479	532	607	716	783	906
92	195	276	348	378	426	495	540	599	702	788	910

Tabla 11: Resultados de  $V_o'$  tras la reflexión en distintos colores del codificador óptico diseñado

Estos resultados nos muestran que a medida que la luz se refleja en una tonalidad de gris más clara, más luz llega al fotodetector y genera más voltaje a la salida del driver receptor. Vemos que cada tonalidad se mantiene alrededor de un cierto valor por lo que se puede establecer un rango de voltaje característico para cada color del encoder. Estos rangos se podrían ajustar más y podríamos ser capaces de diferenciar más niveles de grises, pero podemos considerar que para la aplicación de este proyecto, diferenciar diez niveles de gris es suficiente. Tras realizar una gran cantidad de medidas para asegurar continuidad del sistema, hemos obtenido el rango de cada componente del encoder teniendo en cuenta la peor medida cogida. El límite inferior viene dado por el menor voltaje medido y el límite superior por el valor máximo medido en cada caso. Todos estos valores nos serán de gran utilidad a la hora de diseñar la interfaz gráfica usando LabVIEW.

- **Negro:** [80 mV – 132 mV]
- **Gris Tonalidad 1:** [189 mV – 225 mV]
- **Gris Tonalidad 2:** [250 mV – 290 mV]
- **Gris Tonalidad 3:** [310 mV – 360 mV]
- **Gris Tonalidad 4:** [380 mV – 405 mV]
- **Gris Tonalidad 5:** [420 mV – 460 mV]
- **Gris Tonalidad 6:** [475 mV – 505 mV]
- **Gris Tonalidad 7:** [525 mV – 550 mV]
- **Gris Tonalidad 8:** [590 mV – 630 mV]
- **Gris Tonalidad 9:** [690 mV – 725 mV]
- **Gris Tonalidad 10:** [750 mV – 800 mV]
- **Blanco:** [890 mV – 1.000 mV]



## CAPÍTULO 8: INTERROGACIÓN REMOTA

En esta parte del proyecto nos centraremos en lo que le ocurre a la información proporcionada por el sensor óptico que hemos diseñado. A la salida del driver emisor nos da un nivel de tensión según el color del encoder en el que se refleja el haz de luz emitido por el driver emisor. Esta información es voltaje analógico que será leído por una placa Arduino a través de uno de los cinco pines de entrada analógica que contiene. Tras leer este voltaje, se comunicará a través del puerto serie con un módulo Xbee que tendrá anclado. Este anclaje se realiza a través de una placa de expansión conocida como “Xbee Shield”. Los módulos Xbee nos permiten enviar información a través de radiofrecuencia usando el protocolo de comunicación ZigBee. La información enviada por el módulo Xbee, es recibida por otro módulo que irá conectado a un PC. El módulo receptor y el PC se comunican a través de USB por lo que somos capaces de enviar la información recibida al PC y manipular esta información para satisfacer los requisitos del proyecto. Para esto, hemos creado un programa con LabVIEW, un software de desarrollo de sistemas de National Instruments que utiliza un lenguaje de programación gráfico. Se usa un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto. Cada programa se compone de dos partes: el panel frontal y el diagrama de bloques. El primero es la interfaz del usuario mediante el cual puede interactuar con el programa cuando éste está en ejecución, durante la cual, los datos del programa son actualizados en tiempo real. Así facilitamos la tarea del usuario al ofrecer una interfaz gráfica fácil de entender. En la figura 56, podemos ver todos los elementos que forman la interrogación remota del sistema diseñado.



Figura 55: Elementos que forman la Interrogación remota del sistema diseñado

Primero haremos un estudio de Arduino y justificaremos su uso en este proyecto. Después explicaremos el código diseñado para conseguir una comunicación serie con el módulo Xbee. Segundo, analizaremos las ventajas de los módulos Xbee y explicaremos los parámetros que tenemos que configurar para conseguir una comunicación punto a punto. Por último, describiremos la herramienta LabVIEW y algunas de sus funcionalidades más importantes. Tras esto, se dará una descripción detallada del programa diseñado y los resultados obtenidos.

## 8.1. ARDUINO UNO

Arduino es una compañía electrónica de desarrollo de hardware y software fáciles de usar. Surgió en el Instituto de Diseño interactivo de Ivrea, norte de Italia, como una herramienta de prototipado rápido y sencillo pensado para estudiantes con deficiencias en el campo de la electrónica o la programación. Con el tiempo se fue adaptando a las nuevas necesidades y desafíos diferenciando su oferta. Se decidió usar Arduino en esta aplicación porque facilita la programación compleja de microcontroladores. Además, es una solución barata y al ser de código abierto, tanto para software como para hardware, no se requiere de licencias para usarlo. Es una herramienta sencilla gracias a su entorno de programación que permite desarrollar cualquier tipo de idea [Arduino].

El hardware de Arduino consiste en una placa de circuito impreso con un microcontrolador, normalmente el "ATmega328" cuya hoja de características se puede encontrar en el anexo 6, sencillo de utilizar y de bajo coste que permite el desarrollo de múltiples diseños. Tiene tres tipos de memoria. La capacidad de la memoria Flash es de 16 KB de los cuales dos de ellos son utilizados por el bootloader. La memoria SRAM (Static Random Access Memory) es de 1 KB y la EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) de 512 B. La velocidad del reloj viene establecida por un cristal de cuarzo de 16 MHz [Anexo 6]. En particular, en este proyecto se ha utilizado la placa Arduino UNO. Este nombre se dio para marcar el lanzamiento de la primera versión de hardware y software (versión 1.0.), las cuales han evolucionado hasta llegar a la versión más reciente (versión 1.8.1.) [Arduino]. La figura 57 nos muestra cómo es físicamente la placa y se nombran sus componentes más destacados.

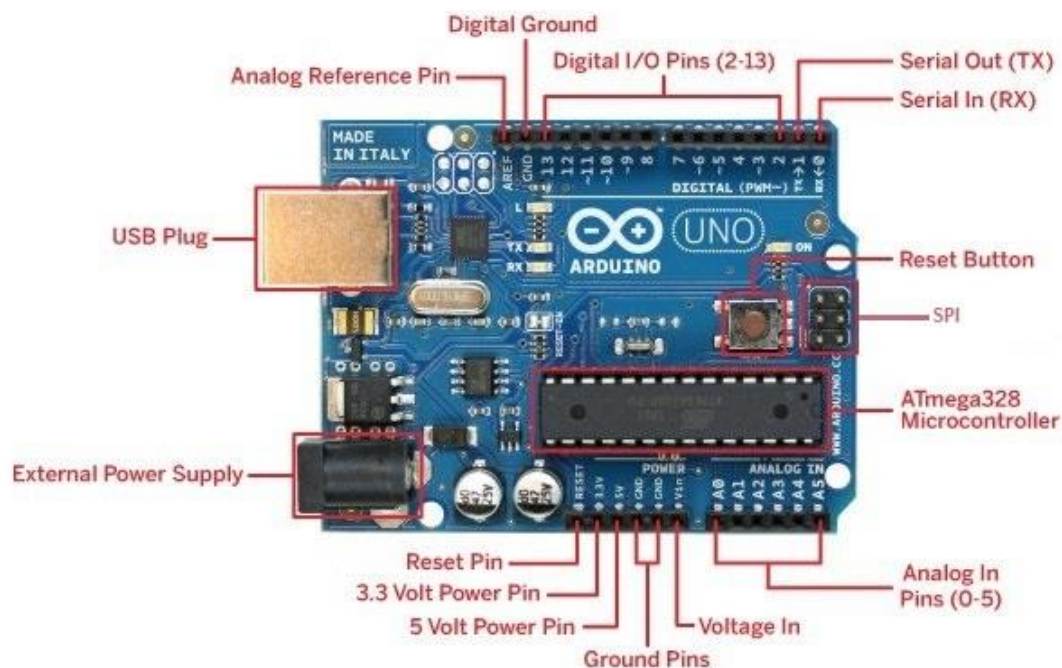


Figura 56: Placa Arduino UNO con nombramiento de sus componentes más destacados [Aforum].

Tiene dos fuentes de alimentación de tensiones distintas, una a 3,3 V y otra a 5 V, y un pin de tierra. Además del botón de reinicio, cuenta con un pin llamado “reset” por si se deseara construir con botón de reinicio fuera de la placa Arduino. En ocasiones el acceso al botón existente es imposible, como es el caso cuando se usan placas de expansión que impiden su acceso, o porque el sistema está contenido en un recipiente y se desea colocar el botón fuera de éste. Esta placa cuenta con catorce pines digitales de entrada, numeradas de 0 al 13, de las cuales seis se pueden configurar como salidas PWM (Pulse-Width Modulation). Tiene seis entradas analógicas (numeradas del 0 al 5), una conexión USB y un conector de alimentación de 7 a 12 voltios. Aparte de la comunicación USB, la placa tiene la posibilidad de usar otros tipos de comunicación serie para comunicarse con dispositivos periféricos rápidamente en distancias cortas. Una de ellas es el protocolo SPI, cuyos conectores se pueden ver en la derecha de la figura 57. Los pines digitales numerados como 0 y 1, corresponden a la entrada (Rx) y salida (Tx) respectivamente del puerto serie conocido como UART. Como hemos dicho anteriormente, existen placas de expansión, conocidas en inglés como “shields”, que amplían las características de funcionamiento de la placa Arduino y se comunican mediante alguno de los estos protocolos **[Aserial] [Ai2c] [Aspi]**.

El software Arduino, por otro lado, también es de código abierto y está creciendo a través de las contribuciones de los usuarios de todo el mundo. El entorno de desarrollo de Arduino, conocido en inglés como IDE cuyas siglas significan “Integrated Development Environment”, es una herramienta que facilita la tarea de escribir el código y subirlo a la placa en cuestión. Una de sus ventajas es la posibilidad de funcionar en diferentes plataformas como Windows, Macintosh y Linux. El IDE de Arduino es un conjunto de “Processing” y “Wiring”. “Processing” es un lenguaje de programación y entorno de desarrollo integrado de código abierto basado en Java de fácil utilización y “Wiring” es una plataforma escrita también en Java, pero con la diferencia de que tiene un compilador de C/C++ para que las operaciones de entrada y salida sean mucho más fáciles **[Arduino]**.

Como veremos más adelante, existe una placa para anclar un módulo Xbee en una placa Arduino, conocida como Xbee Shield, y se usará para establecer una comunicación inalámbrica entre el módulo emisor y receptor de la interrogación remota. Esta placa de expansión se comunica con el Arduino mediante el puerto serie. Para establecer esta comunicación se necesitan al menos dos conectores para realizar la comunicación de datos, Rx (recepción) y Tx (transmisión) usando niveles lógicos TTL (0 - 5V). No obstante, pueden existir otros canales como para referencia de tensión, sincronismo de reloj, etc. El monitor de puerto serie, cuyo aspecto se puede ver en la figura 58, es una pequeña utilidad integrada dentro del IDE de Arduino que nos permite enviar y recibir fácilmente información a través del puerto serie. Su uso es muy sencillo, y dispone de dos zonas, una que muestra los datos recibidos, y otra para enviarlos.

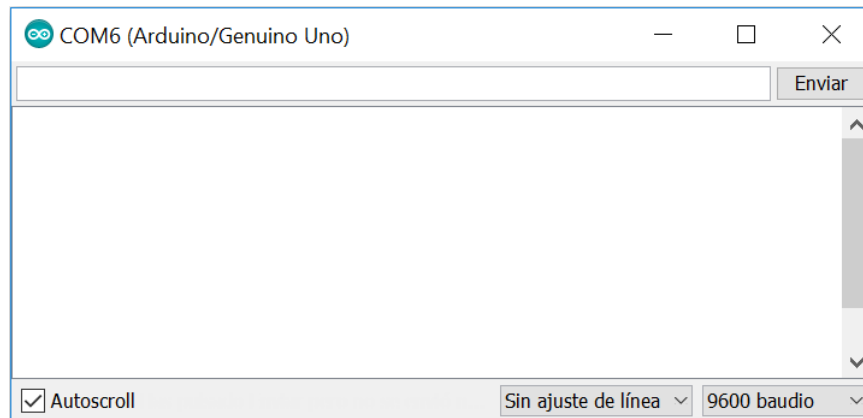


Figura 57: Monitor de puerto serie de Arduino

Las funciones más importantes que debemos conocer para manejar el puerto serie correctamente son: “begin()”, “read()”, “write()”, “print()” e “if(Serial)”.

- “begin()” establece la velocidad de la UART en baudios para la transmisión serie. También se pueden configurar el número de bits de datos, la paridad y los bits de stop cuyos valores por defecto son 8 bits de datos, sin paridad y un bit de stop.
- “read()” lee el primer byte entrante del buffer serie.
- “write()” escribe datos en binario al puerto serie en forma de bytes.
- “print()” imprime datos al puerto serie como texto ASCII.
- “if(Serial)” especifica si el puerto serie está listo.

### 8.1.1. CÓDIGO ARDUINO

```
//Código Arduino del módulo EMISOR

#include <avr/io.h>

//Declaración de variables:
float SensorValue = 0; //Valor del voltaje del sensor después de
                        //la conversión
int Voltage = 0; //Lectura de analogRead que será convertido

void setup() {
  /*Inicializamos la comunicación serial a una velocidad de 9600
  bits por segundo. Como el resto de parámetros están vacíos,
  tiene: 8 bits & No parity & 1 StopBit*/
  Serial.begin(9600);
}
```

```

void loop() {
    Voltage = analogRead(A0); //Usaremos la entrada 0 de las 5
                               //existentes

    /*Convertir la lectura, que va de 0 a 1023 unidades, a un
    voltaje de entre 0 y 5 V*/
    SensorValue = Voltage * (5.0 / 1023.0);

    //Comprobamos que la comunicación serie está disponible
    if(Serial){
        Serial.println(SensorValue); //Enviamos el dato del
                                     //sensor al módulo Xbee
    }

    delay(100); //Delay entre lecturas para proporcionar
                //estabilidad
}

```

Antes de empezar es importante saber que el módulo Xbee no puede ir montado en la placa Arduino mientras lo programamos ya que si no, no podríamos establecer la comunicación serial. El programa comienza incluyendo librerías externas al código que pueden ser escritas especialmente para Arduino u otras librerías de C estándar. En nuestro caso, “`#include <avr/io.h>`”, define los registros de Input y Output del dispositivo. Este archivo incluye los siguientes [AVR]:

- `#include <avr/sfr_defs.h>`
- `#include <avr/portpins.h>`
- `#include <avr/common.h>`
- `#include <avr/version.h>`

Como hemos dicho, la función “`begin()`” establece la velocidad del puerto serie (UART) en función de baudios. La velocidad, en nuestro caso, para enviar información al módulo Xbee, es de 9600 baudios. Por defecto, el resto de parámetros son 8 bits de datos, sin paridad y un bit de stop.

Recordemos que en esta parte del proyecto, la luz que emite el driver emisor reflejará en el encoder que diseñemos. El extremo de la fibra del driver receptor recibirá una cantidad de luz y dará una tensión a su salida que será medida por la placa Arduino a través de una de las cinco entradas analógicas que tiene. Mediante la función “`analogRead(A0)`” establecemos que el pin de lectura es el numerado como cero y conseguimos medir esa tensión dada por el sensor. Esta medida se guarda en la variable de tipo int llamada “`Voltage`”. El microcontrolador de la placa Arduino, “ATMEGA328”, tiene un convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits [Anexo 6]. Esto significa que tiene una resolución de 1024 valores ( $2^{10}=1024$ ) que convierte la lectura analógica a un valor entre 0 y 1023, siendo el primero correspondiente a 0 V y el segundo correspondiente a 5 V. Para saber el valor del voltaje que estamos midiendo, hay que plantear la relación de la ecuación 8.1. Despejando, obtenemos la ecuación 8.2 con la que convertiremos

la lectura del convertidor analógico-digital a un valor de voltaje. Este resultado se guarda en la variable de tipo float, ya que contiene decimales, llamada "SensorValue".

$$\frac{V}{\text{Lectura del ADC}} = \frac{5 V}{1023} \quad (8.1)$$

$$V = \text{Lectura del ADC} \cdot \frac{5}{1023} \quad (8.2)$$

Antes de enviarle la información leía al módulo Xbee a través del puerto serie, comprobamos que este está disponible mediante la función `"if (Serial)"`. El envío de esta información se hace normalmente, como si quisiésemos ver un resultado por el monitor serie, mediante la función `"Serial.println(SensorValue)"`. El principio de funcionamiento de esto se explicará más adelante cuando se aborden los detalles de la placa de expansión Xbee (Xbee Shield). En esta función, si la variable a representar es un número, cada dígito se representa con su carácter ASCII equivalente. En el caso de ser una variable de tipo float, se imprime con un máximo de dos decimales. Visto con un ejemplo, la función `"Serial.println(1,23456)"` enviará el valor 1,23. Este detalle es importante ya que sabemos que la lectura del sensor tendrá una precisión máxima de 10 mV (0,01 V).

La placa Arduino tarda 100 microsegundos en leer una entrada analógica por lo que la máxima velocidad de lectura será 10.000 lecturas por segundo, muy superior a la velocidad de lectura que precisa nuestro sistema. Aun sabiendo eso, hemos incorporado una función de espera, `"delay(100)"` de 100 ms para proporcionar estabilidad al programa.

## 8.2. MÓDULOS XBEE

Los módulos Xbee, proporcionados por DIGI International [DIGI], permiten que una placa de Arduino se pueda comunicar inalámbricamente usando el protocolo de comunicaciones ZigBee. DIGI International, cuyo logo se puede ver en la figura 59, es una empresa fundada en 1985 bajo el nombre inicial de DigiBoard. Por otro lado, la empresa MaxStream, especializada en comunicaciones inalámbricas, diseñó una línea completa de soluciones inalámbricas basadas en el protocolo de comunicación ZigBee. Fue en el año 2006 cuando ambas empresas se fusionaron y los módulos Xbee pasaron a formar parte de los productos ofrecidos por DIGI International. Hoy en día DIGI International es líder mundial en conectividad al ofrecer productos baratos y sencillos.



Figura 58: Logo DIGI International [DIGI].

Físicamente, los módulos Xbee son muy pequeños, de unos 25 mm<sup>2</sup> aproximadamente, que disponen de 10 pines a cada lado, de una longitud de 4 mm y separados 2 mm entre sí. Su tensión de operación es 3,3 V y tiene un consumo extremadamente pequeño. La corriente de operación es de 50 mA tanto para transmisión como para recepción, mientras que en el modo de bajo consumo, la corriente desciende a 10µA. Pueden comunicar a una distancia de 100 metros en espacios cubiertos y hasta 300 metros en espacios abiertos. Estas distancias pueden variar según el tipo de antena que se use ya que, una de las ventajas de este tipo de componentes es que, en lugar de elevar la potencia del transmisor de 1 mW, usan receptores más sensibles. En la figura 60, el componente de la izquierda tiene un pequeño cable que sobresale llamado “Whip Antenna”. Seguidamente, en la figura central, podemos ver un conector pequeño para conectar tu propia antena. Este tipo de dispositivo se usa en los casos en los que el sistema está contenido en un recipiente y se desea colocar la antena fuera de éste. Por último, la figura de la derecha nos muestra el “Chip Antenna” que es más rápido y barato que la antena convencional [Xbee].

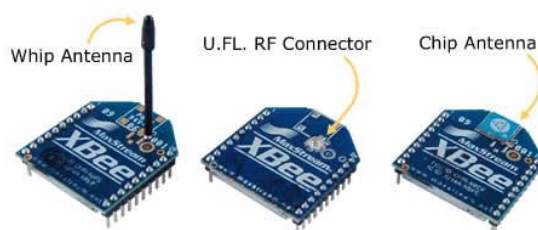


Figura 59: Tipos de antena en módulos Xbee [Xbee].

### 8.2.1. CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE

Hay varias formas para programar los módulos Xbee, pero, en el presente documento técnico, lo haremos mediante el software XCTU, proporcionado por DIGI International. Con éste podemos programar los módulos Xbee de manera sencilla y rápida, la cual explicaremos detalladamente a lo largo del capítulo. Ésta herramienta nos permite también actualizar los firmwares de los módulos y comprobar su correcto funcionamiento. El logo de éste programa se puede ver en la figura 61.

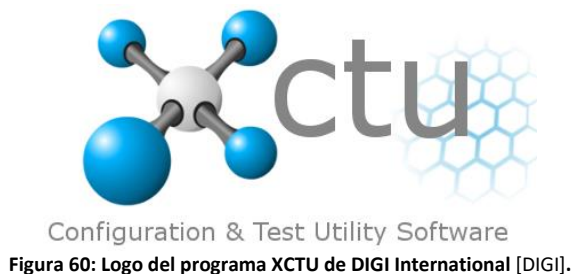


Figura 60: Logo del programa XCTU de DIGI International [DIGI].

Existe una placa para anclar un módulo Xbee en una placa Arduino, conocida como Xbee Shield, que permitirá una comunicación inalámbrica usando el protocolo de comunicación ZigBee. Esta placa se puede ver representada en la figura 62.



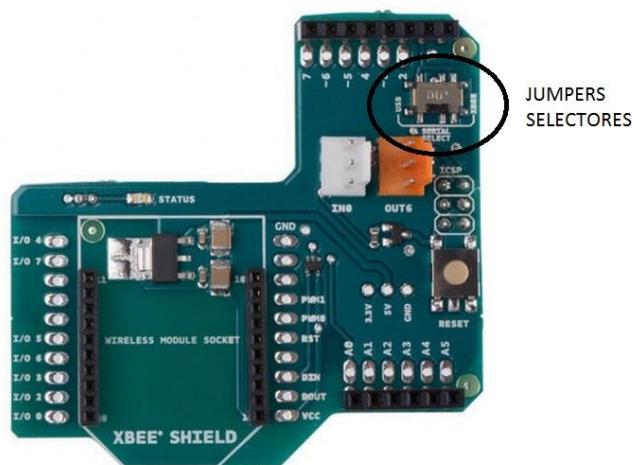


Figura 61: Placa Xbee Shield [Xbee].

La placa, obstruye los pines digitales del 2 al 7 y todas las entradas analógicas por lo que proporciona unos conectores hembra para que el usuario pueda conectar lo que desee. El resto de pines no quedan bloqueados por lo que se puede conectar normalmente a la placa Arduino. Cuenta con un botón de Reset y unos orificios soldables en los que se podrían poner conectores, para facilitar la conexión a los pines de los módulos Xbee. Dispone de unos jumpers selectores, señalados en la figura 62, que determinan cómo se conecta el módulo Xbee a la comunicación en serie entre el microcontrolador “ATMEGA328” y el cable USB. Realmente la comunicación no se da entre el microcontrolador y el cable USB sino que se da entre el microcontrolador y chip que convierte la comunicación USB a comunicación en serie de la placa Arduino. Los convertidores que emplean son fabricados por la empresa FTDI, cuyas siglas en ingles significan “Future Technology Devices International” **[FTDI]**. Esta empresa ofrece una amplia gama de productos que incluyen módulos, cables y circuitos integrados para conectividad USB y distintos sistemas de visualización. Las dos opciones de los jumpers son posición Xbee o posición USB.

Con los jumpers en la posición Xbee, el pin D<sub>OUT</sub> del módulo Xbee está conectado al pin Rx (entrada) del microcontrolador y el pin D<sub>IN</sub> está conectado al pin Tx (salida) del microcontrolador. Hay que tener en cuenta que los pines Rx y Tx del microcontrolador siguen conectados a los pines Tx y Rx respectivamente del convertidor FTDI, por lo que los datos enviados desde el microcontrolador serán transmitidos al ordenador a través de USB y, asimismo, enviados de forma inalámbrica por el módulo Xbee usando el protocolo ZigBee. Esa es la razón por la cual en el código Arduino hemos usado la función “`Serial.println()`” que muestrea los datos en el monitor serie, ya que, esta información se enviará tanto al ordenador a través de USB, como al otro módulo Xbee de forma inalámbrica. El microcontrolador, sin embargo, sólo podrá recibir datos del módulo Xbee, no por USB desde el ordenador.

Con los jumpers en la posición USB, el pin D<sub>OUT</sub> el módulo Xbee está conectado al pin Rx del convertidor USB-serie FTDI y, el pin D<sub>IN</sub> en el módulo Xbee está conectado al pin Tx del chip convertidor. Esto significa que el módulo Xbee puede comunicarse directamente con el ordenador pero sólo si se quita el microcontrolador de la placa Arduino. Si se dejase puesto, el módulo Xbee sería capaz de comunicarse con el ordenador vía USB pero, ni el ordenador ni el



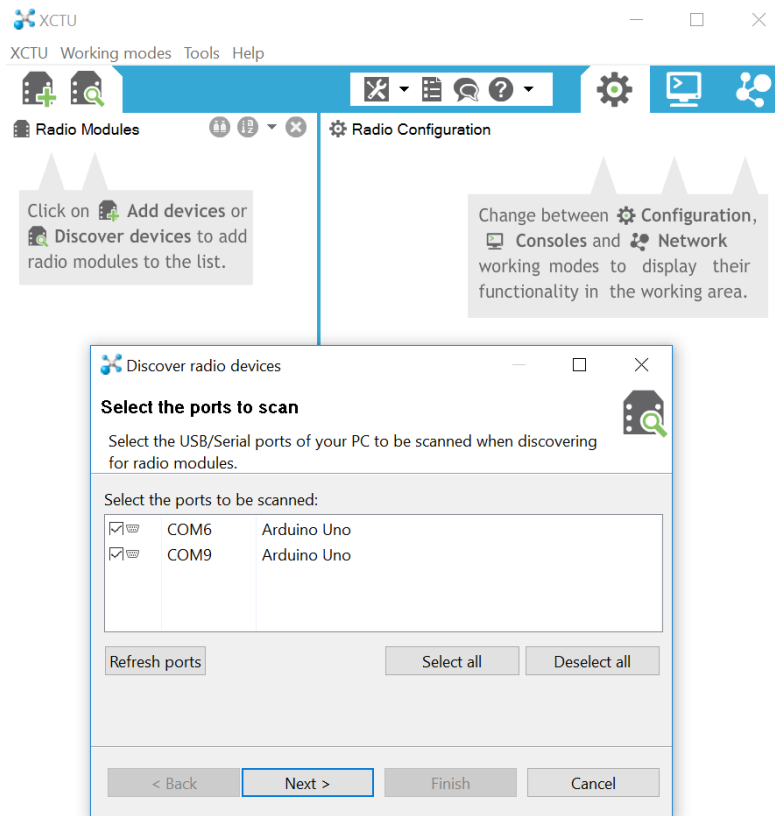
microcontrolador serían capaces de comunicarse con el módulo Xbee [XBArduino]. Para poder configurar el módulo Xbee, por tanto, debemos poner los jumpers selectores en modo USB y quitar el microcontrolador “ATMEGA328” de la placa Arduino dejando visibles los zócalos, como podemos ver en la figura 63. De esta forma se consigue una conexión USB con el módulo Xbee directamente.



Figura 62: Placa Arduino UNO sin su microcontrolador ATMEGA328

Ahora podemos comenzar con la programación de los módulos Xbee abriendo el programa XCTU. En la pantalla principal podemos mostrar los dispositivos de radiofrecuencia conectados al ordenador, sabiendo el nombre del puerto USB al que están conectados y sus parámetros. La figura 64 nos muestra la pantalla principal del programa, y la opción de seleccionar el puerto USB deseado. Pulsando “Next”, podemos seleccionar los parámetros que determinan el comportamiento de los módulos Xbee, y en nuestro caso, hemos establecido:

- Velocidad de 9600 baudios.
- 8 bits de datos
- Sin paridad
- 1 bit de parada
- Sin control de flujo



**Figura 63:** Pantalla principal de XCTU con la opción de seleccionar el puerto USB deseado

En esta parte del proyecto, tenemos que conseguir configurar un módulo Xbee como el emisor y otro como receptor. Con esto conseguimos establecer una red punto a punto en la que el dispositivo receptor irá conectado al PC y recibe la información del otro dispositivo, el cual está situado cerca del sensor que hemos diseñado. Para que los dos módulos se puedan comunicar en una red punto a punto, tenemos que configurar los siguientes parámetros:

- Ambos dispositivos tienen que estar en el mismo canal dado por el parámetro CH y que su valor por defecto es 12 (C en hexadecimal).
- Ambos dispositivos tienen que estar en la misma red, la cual viene dada por el parámetro conocido como ID, y su valor por defecto es 3332.
- La dirección de destino de un módulo, que viene dada por los parámetros DH y DL, determina qué dispositivo, presente en la misma red y canal, le va a transferir datos. Para poder establecer una comunicación punto a punto, la dirección de destino de un módulo es la dirección del otro módulo. La dirección de cada módulo es única y se puede ver escrita en la parte posterior del dispositivo. En nuestro caso en concreto, la dirección del dispositivo emisor es "13A200-40015BB2". En cambio, la dirección del dispositivo receptor es "13A200-40E3120E"

Ahora podemos concluir que el parámetro DH es el mismo para todos los módulos Xbee y es "13A200". Los ocho siguientes caracteres corresponden al parámetro DL. En nuestro caso, el parámetro DL del módulo emisor es "40E3120E" y para el receptor "40015BB2".

- El parámetro MY es la dirección de la fuente de 16 bits y debe ser distinta en cada módulo. En nuestro caso diremos que para el módulo emisor el parámetro MY es 0 y en el módulo receptor 1.
- Para que ambos dispositivos envíen la información del mismo modo, el comando MM (MAC Mode) debe ser "802.15.4 No ACKs [1]" para ambos.
- El parámetro API deshabilitado nos permitirá configurar ambos dispositivos en modo transparente. En el modo transparente, el módulo envía los mensajes que recibe por su puerto serie. Sin embargo, en el modo API, los comandos, mensajes y respuestas viajan dentro de un framing y permite mandar y recibir mensajes de múltiples dispositivos en una única interfaz. Este modo se usa en redes punto multipunto en los que interviene un dispositivo coordinador de la red.
- Siguiendo la línea de razonamiento, ambos dispositivos se tendrán que configurar como "End Device" ya que no existe coordinador en nuestro caso.

Sabiendo todo esto, en la pantalla principal del programa XCTU, seremos capaces de ver los dispositivos que queremos configurar. Simplemente con pulsar uno de ellos, podemos acceder a los parámetros que definen el comportamiento de ese módulo Xbee y cambiarlos para que cumpla las especificaciones de nuestro sistema. En las siguientes figuras podemos ver los parámetros para ambos dispositivos. En la figura de la izquierda podemos ver la configuración del receptor y en la derecha hemos configurado el dispositivo emisor. En algunos parámetros encontramos un pequeño triángulo azul en su extremo, lo cual indica que han sido modificados. Adicionalmente, cabría destacar que los dos módulos usados tienen versiones de firmware distintas por lo que, en la versión más reciente, que pertenece al módulo emisor, aparecen más parámetros que poder configurar.

#### ▼ Networking & Security

Change networking settings

CH Channel	C
ID PAN ID	3332
DH Destinat...ess High	13A200
DL Destinat...ress Low	40E3120E
MY 16-bit S... Address	1
SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	40015BB2
RN Random ...y Slots	0
MM MAC Mode	802.15.4 no ACKs [1]
CE Coordinator Enable	End Device [0]
SC Scan Channels	1FFE Bitfield
SD Scan Duration	4 exponent
A1 End Devi...ociation	0000b [0]
A2 Coordina...ociation	000b [0]
AI Association Status	0

#### ▼ RF Interfacing

Change RF interface options

PL Power Level	Highest [4]
CA CCA Threshold	2C -dBm

#### ▼ Sleep Modes (NonBeacon)

Configure low power options for NonBeaconing systems

SM Sleep Mode	No Sleep [0]
ST Time before Sleep	1388 x 1 ms
SP Cyclic Sleep Period	0 x 10 ms
DP Disassoc...p Period	3E8 x 10 ms

#### ▼ Serial Interfacing

Change modem interfacing options

BD Interface Data Rate	9600 [3]
RO Packetiz... Timeout	3 x cha...times
D7 DIO7 Configuration	CTS flow control [1]
D6 DIO6 configuration	Disabled [0]
D5 DIO5 configuration	Associated indicator [1]
P0 PWM0 Co...uration	RSSI [1]
AP API Enable	API disabled [0]
PR Pull-up R...or Enable	FF

Figura 64: Configuración del módulo Xbee receptor

#### ▼ Networking & Security

Modify networking settings

CH Channel	C
ID PAN ID	3332
DH Destinat...ess High	13A200
DL Destinat...ress Low	40015BB2
MY 16-bit S... Address	0
SH Serial Number High	13A200
SL Serial Number Low	40E3120E
MM MAC Mode	802.15.4 no ACKs [1]
RR XBee Retries	0
RN Random ...y Slots	0
NT Node Dis...ver Time	19 x 100 ms
NO Node Di...Options	0
CE Coordinator Enable	End Device [0]
SC Scan Channels	1FFE Bitfield
SD Scan Duration	4 exponent
A1 End Devi...ociation	0000b [0]
A2 Coordina...ociation	000b [0]
AI Associati...ndication	0
EE AES Encr...n Enable	Disable [0]
KY AES Encryption Key	
NI Node Identifier	

#### ▼ RF Interfacing

Modify RF interfacing options

PL Power Level	Highest [4]
CA CCA Threshold	2C -dBm

#### ▼ Sleep Modes (NonBeacon)

Configure low power options for NonBeacon systems

SM Sleep Mode	No Sleep [0]
ST Time before Sleep	1388 x 1 ms
SP Cyclic Sleep Period	0 x 10 ms
DP Disassoc...p Period	3E8 x 10 ms
SO Sleep Options	0

#### ▼ Serial Interfacing

Modify modem interfacing options

BD Interface Data Rate	9600 [3]
NB Parity	No Parity [0]
RO Packetiz... Timeout	3 x cha...times
AP API Enable	API disabled [0]

#### ▼ Serial Interfacing

Modify modem interfacing options

BD Interface Data Rate	9600 [3]
NB Parity	No Parity [0]
RO Packetiz... Timeout	3 x cha...times
AP API Enable	API disabled [0]

Figura 65: Configuración del módulo Xbee emisor.

### 8.3. LABVIEW

La instrumentación virtual ha supuesto una revolución de la instrumentación electrónica tradicional ya que se pueden realizar diferentes operaciones sin disponer físicamente de componentes electrónicos. En la instrumentación electrónica, el componente a utilizar tiene características definidas por el fabricante las cuales no podemos modificar. En cambio, en la instrumentación virtual, el usuario puede diseñar sus propios sistemas haciéndose uso de los ordenadores para poder implementar tanto el software como el hardware de una aplicación. Podemos realizar mediciones de señales eléctricas tanto de corriente como de voltaje con una gran precisión y número de muestras por segundo. También se encarga del procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y representación de los datos obtenidos de la señal. Todo esto nos facilita la tarea de controlar complicados procesos y se consiguen altas prestaciones, flexibilidad, reutilización y reconfiguración a la vez que se logra una gran disminución del coste de desarrollo y mantenimiento.

LabVIEW, cuyas siglas en inglés significan “Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench”, es un ejemplo de instrumentación virtual desarrollado por National Instruments que salió por primera vez al mercado en 1986. En el presente proyecto se ha trabajado con la versión LabVIEW 2016. Es un lenguaje de programación gráfico (G, por la palabra inglesa “Gráfico”) que utiliza un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto, lo que le permite escribir código utilizando un diseño visual. Entre sus enormes ventajas, se reduce el tiempo empleado en la sintaxis del lenguaje programación para emplearlo resolviendo problemas **[NI]**. Cada programa se conoce como instrumento virtual (VI) y se compone de dos partes: el panel frontal y el diagrama de bloques. El primero es la interfaz del usuario mediante el cual puede interactuar con el programa cuando éste está en ejecución, durante la cual, los datos del programa son actualizados en tiempo real. Las entradas se representan con controles y las salidas con indicadores. Por otro lado, en el diagrama de bloques se describe la funcionalidad del programa y cada control o indicador del panel frontal tiene su terminal correspondiente aquí. Los distintos iconos representan las operaciones que se realizan en el programa. Adicionalmente, existen paquetes de expansión que nos podemos descargar para acceder a más funciones predeterminadas. Todos los controles, indicadores, estructuras y funciones se conocen como nodos y se conectan entre sí mediante una línea recta por la que fluyen los datos. La ejecución, por tanto, es secuencial ya que una tarea no se inicia hasta tener todas sus variables de entrada o hasta que las tareas anteriores hayan terminado de ejecutarse. Para explicar el funcionamiento general de LabVIEW, en la figura 67 podemos ver el diagrama de bloques de un programa sencillo en LabVIEW. En éste tenemos un control que es introducido por el usuario al que se le suma otro valor. Tras la suma se producen dos funciones distintas. Por un lado, el resultado se convierte a una cadena de caracteres y se representa en el indicador del panel central con el nombre de “String”. Por otro lado, si el resultado es mayor que cero, el LED del panel central se iluminará.

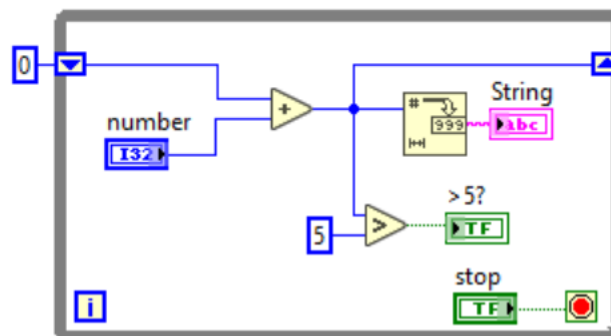


Figura 66: Diagrama de Bloques de un programa sencillo diseñado con LabVIEW

Los colores de las líneas además juegan un papel importante ya que nos indican el tipo de dato que fluye por la línea en cada caso. En la figura 67 vemos que el color azul corresponde a números de tipo “integer” de 32 bits, las líneas verdes son de tipo booleano y las rosas, cadenas de caracteres. Todo está dentro de un bucle “while” que sólo se parará cuando se pulse el botón de Stop. Las flechas en los laterales del bucle “while” se conocen en inglés como “shift registers” y pasan los datos entre iteraciones del ciclo. Es importante tener en cuenta que hay que inicializar los valores cuando ejecutamos el programa por primera vez, en nuestro caso, en el primer bucle tendrá valor cero. Una vez que tenemos nuestro programa diseñado, se pulsa el botón de ejecutar que tiene forma de flecha. Si existiese algún error en la programación, esta flecha aparecería quebrada y pulsándola, saldría un diálogo mostrando los posibles errores. Una vez que el programa se ha ejecutado, podemos interactuar con el programa mediante el panel de control que podemos ver representado en la figura 68.



Figura 67: Panel Frontal de un programa sencillo diseñado con LabVIEW

### 8.3.1. PROGRAMA LABVIEW

Antes de comenzar con la descripción del programa LabVIEW diseñado, explicaremos, mediante un diagrama de flujo simplificado, el funcionamiento general del programa, ver figura 69.



Figura 68: Diagrama de flujo del funcionamiento del programa LabVIEW diseñado

Comparamos la medida proporcionada por el driver receptor con un umbral para determinar en qué color del encoder diseñado se ha reflejado el haz de luz del sensor óptico. Como podemos recordar, en el capítulo 7, titulado “Encoder Óptico”, hicimos la caracterización del encoder y se estableció un rango de voltajes para cada color del encoder. El límite inferior de cada rango venía dado por el menor voltaje medido y el límite superior por el valor máximo medido en cada caso. El umbral para cada color del encoder será equidistante entre el voltaje más alto medido en un nivel, y el menor medido en el siguiente nivel. En la tabla 12 podemos ver todos los resultados.

Color	Límite inferior	Límite superior	Cálculo del umbral	Umbral	Nombre del umbral
Negro	80	132			
			160,5	0,16	Umbral 0
Gris Tonalidad 1	189	225			
			237,5	0,24	Umbral 1
Gris Tonalidad 2	250	290			
			300	0,3	Umbral 2
Gris Tonalidad 3	310	360			
			370	0,37	Umbral 3
Gris Tonalidad 4	380	405			
			412,5	0,41	Umbral 4
Gris Tonalidad 5	420	460			
			467,5	0,47	Umbral 5
Gris Tonalidad 6	475	505			
			515	0,52	Umbral 6
Gris Tonalidad 7	525	550			
			570	0,57	Umbral 7
Gris Tonalidad 8	590	630			
			660	0,66	Umbral 8
Gris Tonalidad 9	690	725			
			737,5	0,74	Umbral 9
Gris Tonalidad 10	750	800			
			845	0,85	Umbral 10
Blanco	890	1000			

Tabla 12: Cálculo del umbral para cada caso de la estructura de casos del programa LabVIEW diseñado



Una vez que sabemos cómo tiene que funcionar el programa, lo primero que necesitamos hacer es abrir comunicación con el puerto USB en el que está conectado el módulo receptor de la interrogación remota. Como dijimos en el apartado anterior, el módulo receptor está formado por una placa Arduino y una “Xbee Shield” que nos permite anclar el módulo Xbee a la placa en cuestión. Para que el PC se pueda comunicar directamente con el módulo Xbee mediante una conexión USB, debemos poner los jumpers selectores en modo USB y quitar el microcontrolador “ATMEGA328” de la placa Arduino. De esta forma el pin D<sub>OUT</sub> el módulo Xbee estaría conectado al pin Rx del convertidor USB-serie y el pin D<sub>IN</sub> al pin Tx. Otra solución sería usar una “Xbee Explorer USB board”, representada en la figura 70X, que nos permite conectar directamente el módulo Xbee al ordenador mediante un conector USB sin necesidad de la placa Arduino.



**Figura 69:** Placa Xbee Explorer [XBexplorer].

Esta placa convierte la comunicación USB del PC a la comunicación serie empleada por el módulo Xbee de una manera sencilla ya que simplemente hay que montar el módulo en los zócalos y conectar un cable mini USB. La placa también dispone de un botón reset y un regulador de tensión para proporcionar el nivel de tensión idónea al módulo. Por limitaciones del proyecto no se ha podido disponer de esta placa y se ha optado por el uso de una placa Arduino sin el microcontrolador “ATMEGA328”, como hemos explicado anteriormente.

Una de las prácticas recomendadas para la gestión de aplicaciones de NI LabVIEW es el explorador de proyectos, que podemos ver representado en la figura 71, en el que podemos agrupar ficheros que intervienen en el programa. Como podemos ver, aparte del programa principal, que hemos guardado bajo el nombre de “Programa”, existen tres subVIs llamados “NuevoCluster”, “Comparar” y “Alarmas”, y un controlador que nos ayudará a crear una estructura de casos.

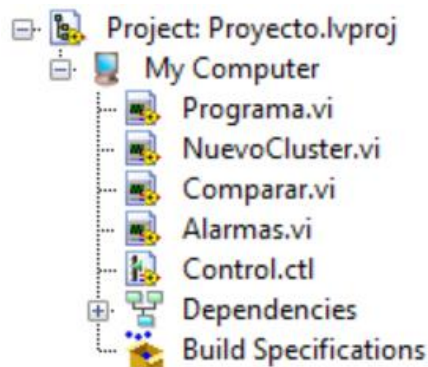


Figura 70: Explorador de proyectos del programa LabVIEW diseñado

A continuación, pasamos a explicar el funcionamiento del programa diseñado en LabVIEW, comenzando con el panel frontal y siguiendo con el diagrama de bloques. El resto de componentes vistos en el explorador de proyectos, serán explicados cuando intervengan en el programa principal. La figura 30 nos muestra el aspecto del Panel de Control de nuestro programa LabVIEW y vemos que contamos con seis componentes.

#### 8.3.1.1. PANEL FRONTAL



Figura 30: Panel Frontal del programa LabVIEW diseñado.

Antes de ejecutar el programa, el usuario debe introducir el nombre del puerto USB en el que está conectado el módulo receptor del sistema para poder comunicarse con él. Adicionalmente, el único poder que tiene el usuario durante la ejecución es el de parar el programa mediante el

botón de Stop. Por otro lado, existen varios indicadores que nos muestran los valores críticos de nuestro sistema. Por un lado podemos ver la velocidad de rotación, en revoluciones por minuto, del sistema y por otro los grados del ángulo de paso de las aspas del aerogenerador. Como hemos explicado en capítulos anteriores, la escala de grises del encoder diseñado está relacionado con el ángulo de paso de las aspas del aerogenerador. Por último, hemos creado dos indicadores de tipo booleano que nos muestran, mediante LEDs, el estado del sistema. La alarma 1 es una advertencia de que la velocidad de rotación de las aspas ha superado la velocidad nominal, a la cual se genera más cantidad de potencia. En la figura 72 vemos el estado de la alarma 1 cuanto está activa, a la derecha de la figura, y cuando no, a la izquierda de la misma.



Figura 71: Estados de la Alarma 1 (izquierda) y 2 (derecha) del programa LabVIEW

Por otro lado, la alarma 2 indica que se ha superado la velocidad máxima que soportan las aspas de un aerogenerador y la turbina debe pararse para evitar daños estructurales. En la figura 73 vemos el estado de la alarma 2 cuanto está activa, a la derecha de la figura, y cuando no, a la izquierda de la misma.

#### 8.3.1.2. DIAGRAMA DE BLOQUES

A continuación pasamos a estudiar el diagrama de bloques implementado y explicaremos paso a paso el funcionamiento del programa, pero antes, para hacernos una idea general, en la figura 74, podemos ver el diagrama de bloques completo.

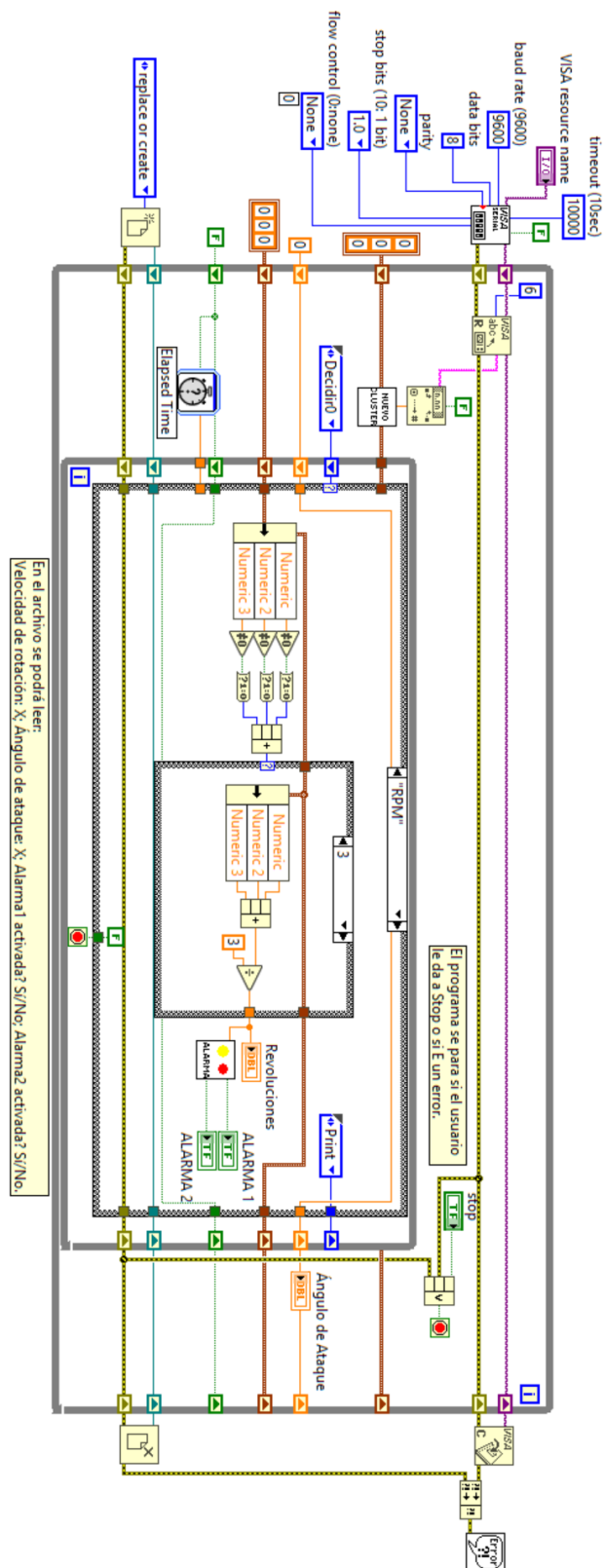


Figura 72: Figura bloques del programa

completa del diagrama de LabVIEW diseñado

Para poder abrir la comunicación serie entre el PC y el módulo Xbee, se ha optado por el uso de VISA, cuyas siglas en inglés significan “Virtual Instrument Software Architecture”. VISA es un estándar para la configuración, programación y debugging de instrumentación que emplean los protocolos de comunicación GPIB, VXI, PXI, serie, Ethernet o USB, nuestro caso particular. La interfaz de programación de aplicaciones, conocida como API cuyas siglas en inglés significan “Application Programming Interface”, es un conjunto de subrutinas, funciones y procedimientos que ofrece cierta biblioteca para ser utilizado por otro software. VISA es un API de alto nivel que llama a los drivers de niveles inferiores **[VISA1]** **[VISA2]**. Para inicializar el Puerto serie especificado por el recurso VISA, tenemos que configurarlo como podemos ver en la siguiente figura 75.

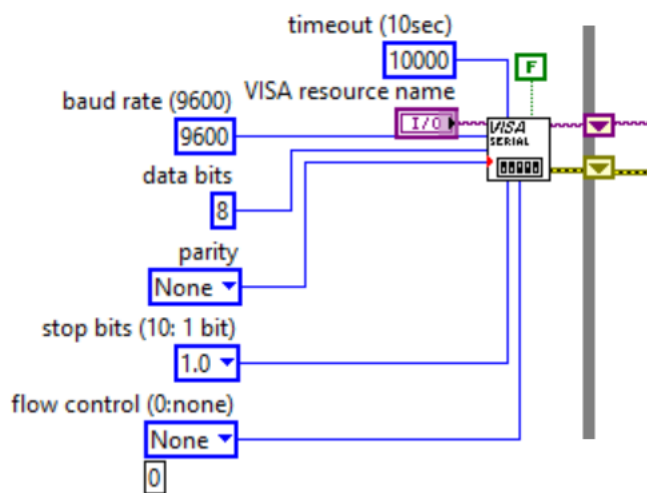


Figura 73: Configuración para la inicialización del puerto serie en el programa LabVIEW diseñado

Como vimos en el apartado de “Módulos Xbee” los parámetros que determinan su comportamiento son:

- Velocidad de 9600 baudios.
- 8 bits de datos
- Sin paridad
- 1 bit de parada
- Sin control de flujo

Mediante un control que hemos visto en el panel de control, el usuario tiene que establecer el puerto USB en el que el dispositivo está conectado. Adicionalmente, para que el programa no se quede esperando infinitamente en el caso de que no haya un dispositivo conectado en dicho puerto, se establece un tiempo de 10 segundos (10.000 ms) de espera tras el cual, si no se ha establecido una comunicación serial, la función producirá error y se parará el programa. Por otro lado sabemos que la trama de datos enviada puede tener un carácter al final que indique su terminación. Por defecto, la función considera que sí existe y el valor por defecto es verdadero (true). En nuestro caso no es así por lo que tenemos que indicar expresamente que no va a haber un carácter que indique final de trama de datos. Una vez que se ha establecido la conexión con

el puerto serie, necesitamos una función que lea los datos de ese puerto. Las siguientes funciones, que se pueden ver en la figura 76, nos proporcionan los datos enviados por el módulo emisor de la interrogación remota.

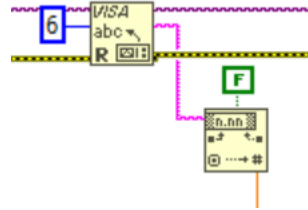


Figura 74: Lectura de datos del puerto serie y de transformación de éstos datos a numéricos en el programa LabVIEW diseñado.

En la primera función tenemos que indicar el número de bytes de lectura. Como sabemos, la placa Arduino del módulo emisor envía datos a través del módulo Xbee mediante la función `Serial.println()`. En esta función, si la variable a representar es un número, cada dígito se representa con su carácter ASCII equivalente. En el caso de ser una variable de tipo float, como es nuestro caso, se imprime con un máximo de dos decimales. Es decir, los datos tienen una precisión máxima de 10 mV (0,01 V), lo que equivale a 6 bytes de datos. El principal inconveniente de ésta función es que el dato de salida es una cadena de caracteres y no un dato numérico, por lo que tenemos que realizar la conversión mediante la función. Ésta es muy sencilla de utilizar ya que el único parámetro que tenemos que configurar es el de tipo booleano. Al configurarlo como falso, indicamos que el símbolo usado para indicar la separación entre la parte entera y la parte fraccional del número, es un punto y no una coma como indica el estándar español.

Existen varios factores que pueden dar lugar a datos erróneos durante la transmisión de información. Primero, hay que tener en cuenta que la lectura proporcionada por el sensor no es perfecta y puede haber datos de dispersión que no concuerdan con el nivel de tensión correspondiente al color de la franja del encoder. Adicionalmente, puede haber errores en la lectura analógica de la placa Arduino o durante el envío de datos entre los módulos Xbee. Por todos estos factores, hemos empleado estructuras de datos, conocidas en inglés como “clusters”, en las que almacenaremos las tres últimas medidas recibidas. Para conseguir esto hemos creado un subVI, cuyo icono ponemos ver en la figura 77, que tiene dos entradas (un número y un “cluster”) y una salida (un “cluster”).



Figura 75: Figura del icono del subVI “Nuevo Cluster” usado en el programa LabVIEW

El panel frontal, representado en la izquierda de la figura 78, contiene dos controles, correspondiente a las entradas y un indicador que corresponde a la salida del subVI. En la parte derecha de la misma vemos las funciones empleadas para actualizar la estructura de datos con

la última medida recibida por el puerto serie. Las primeras cuatro medidas pasarán a ser las últimas, y la nueva lectura del sensor recibida ocupará el primer lugar.

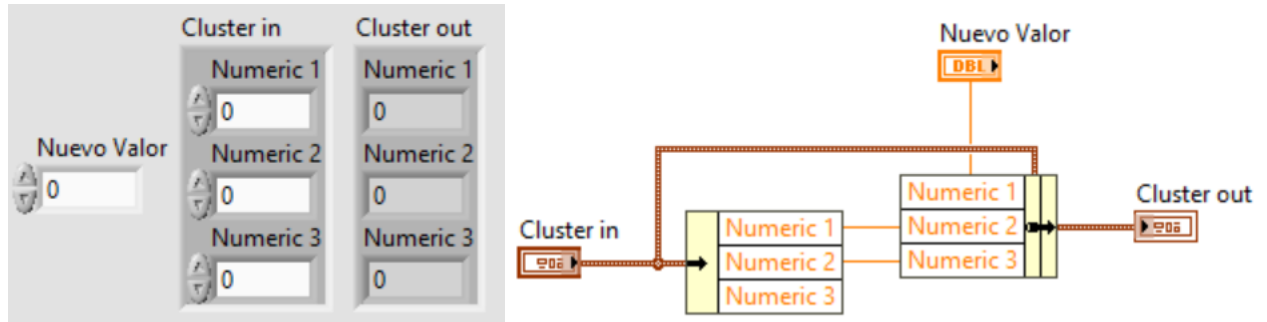


Figura 76: Panel de Control (izquierda) y Diagrama de Bloques (derecha) del subVI "NuevoCluster" del programa LabVIEW diseñado.

A continuación, entramos en una estructura de casos que se ocupará de calcular los objetivos del proyecto. Para ello hemos diseñado un controlador, como hemos visto en el explorador de proyectos, el cual contiene 16 casos, los cuales vamos a explicar individualmente. Los nombres de cada uno son:

- Decidir 0
- Decidir 1
- Decidir 2
- Decidir 3
- Decidir 4
- Decidir 5
- Decidir 6
- Decidir 7
- Decidir 8
- Decidir 9
- Decidir 10
- Negro
- RPM
- Print
- Fin

## 8.3.1.2.1. CASO “Decidir X”

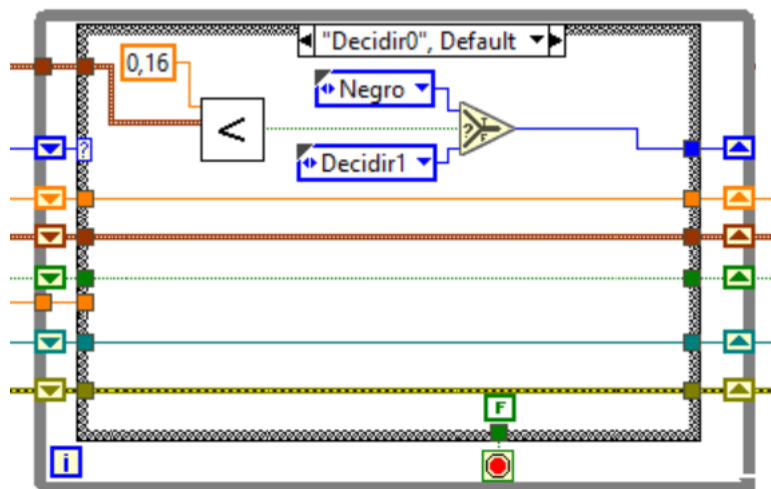


Figura 77: Caso “Decidir 0” de la estructura de casos del programa LabVIEW diseñado

La figura 79 nos muestra las funciones que componen el primer caso, y que a su vez es el caso por defecto, de la estructura de casos diseñada en el programa LabVIEW. En primer lugar, como acabamos de ver, entra una estructura de datos que contiene las cinco medidas del sensor más recientes. Estos cinco valores son comparados mediante un subVI que hemos creado, llamado “Comparar” y cuyo icono ponemos ver en la figura 80, que tiene dos entradas (un número y un “cluster”) y una salida (un booleano). Un subVI es una subrutina que forma parte del algoritmo principal. El funcionamiento general de éste subVI es comparar los cinco valores guardados en el “cluster” con un umbral. Si son menores que el umbral establecido, la salida será verdadera. El resto de líneas presentes en la figura, simplemente pasan la información de un caso al siguiente mediante “shift registers” (explicados al principio del capítulo) y sus datos serán utilizados en casos futuros.



Figura 78: Icono del subVI “Comparar” usado en el programa LabVIEW

El panel frontal, representado en la izquierda de la figura 81, contiene dos controles, correspondiente a las entradas y un indicador que corresponde a la salida del subVI. En la parte derecha de la misma vemos el diagrama de bloques que define el comportamiento del subVI.



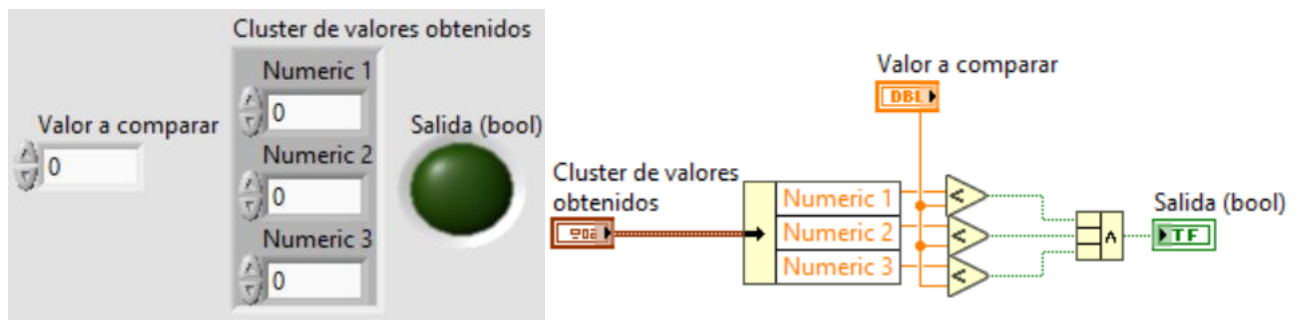


Figura 79: Panel de Control (izquierda) y Diagrama de Bloques (derecha) del subVI "Comparar" del programa LabVIEW

Como hemos dicho al principio, siguiendo la información de la tabla 12, consideraremos que cualquier valor menor de 0,16 V será el correspondiente a reflexión sobre el color negro. Como podemos ver, hay un selector que nos indicará el siguiente caso de la estructura de casos. Si efectivamente, los valores recibidos son menores de 0,16, pasará al caso "Negro", donde calcularemos las revoluciones por minuto. En caso contrario, se irá comparando con todos los umbrales posibles hasta determinar a qué tonalidad de gris pertenece ese voltaje. Si no coincide con ninguno de éstos, el voltaje recibido es mayor de 0,85 V y por descarte sabemos que estamos en franja blanca.

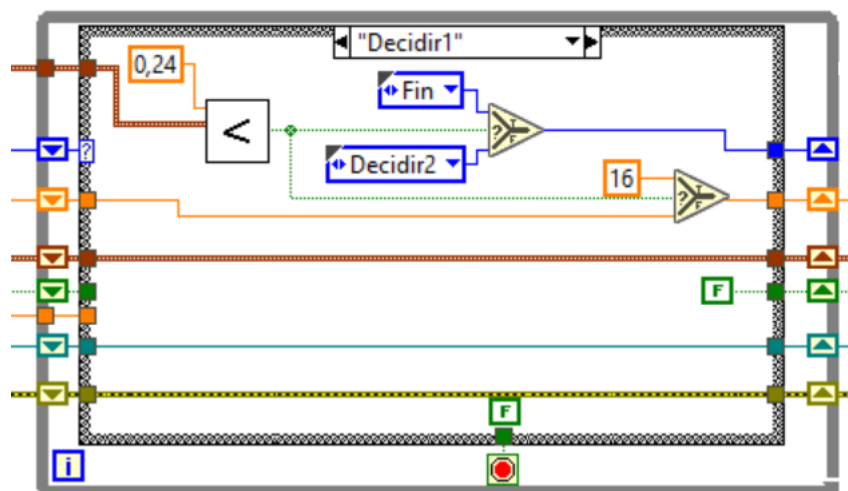
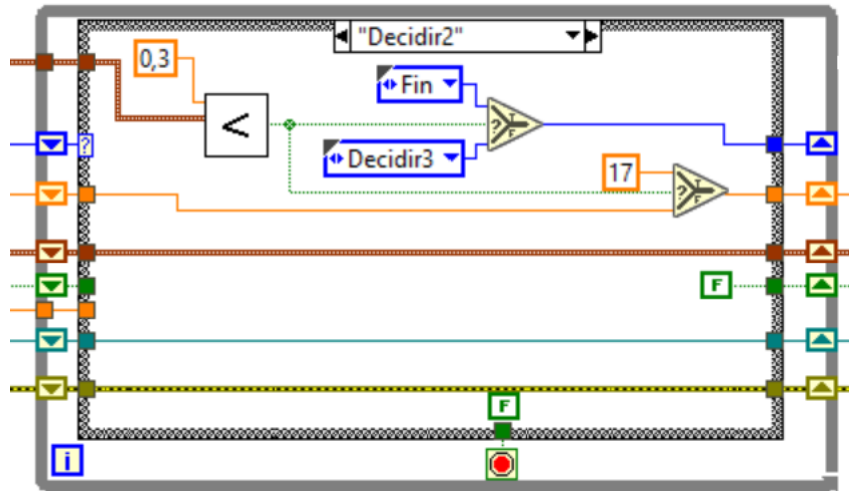


Figura 80: Caso "Decidir 1" de la estructura de casos del programa LabVIEW

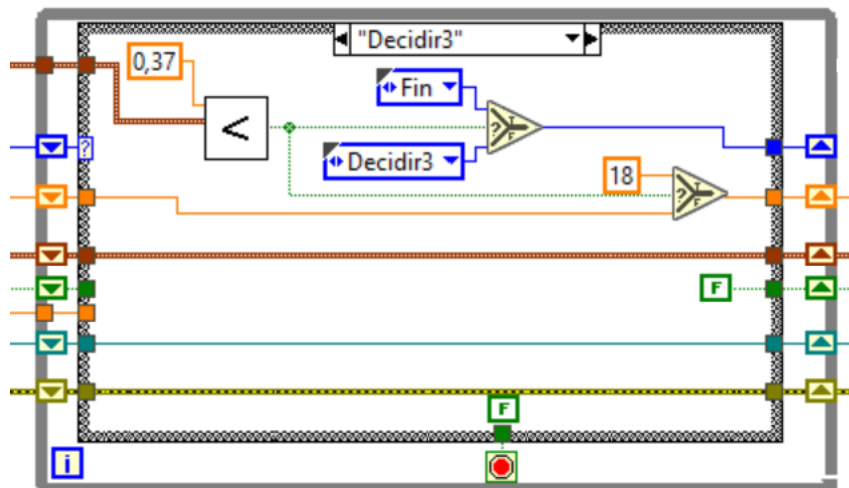
La figura 82 pertenece al caso "Decidir 1" de la estructura de casos diseñada. Podemos ver que, de nuevo, el subVI "Comparar" que acabamos de explicar, es utilizado para saber si los datos recibidos pertenecen al color gris de tonalidad 1 o de tonalidad 2. Si es menor que el umbral que vemos, 0,24 V, será tonalidad 1 y los grados del ángulo de paso serán 16°. En caso de que el resultado de la comparación no sea verdadero, el programa irá al siguiente caso, llamado "Decidir 2" y cuya funcionalidad podemos ver en la figura 83. Desde el caso "Decidir 1" hasta el "Decidir 10", lo único que cambia es el valor del umbral que comparamos y el respectivo ángulo de paso de esa tonalidad de gris. El programa pasará por cada caso hasta encontrar a qué

tonalidad de gris pertenece y por tanto, sabremos el ángulo de paso de las aspas del aerogenerador.



**Figura 81: Caso “Decidir 2” de la estructura de casos del programa LabVIEW**

Como podemos ver, si los datos recibidos son menores que 0,3 V, el color en el que se ha dado la reflexión es de color gris de tonalidad 2 y por tanto, el ángulo de paso de las aspas es de 17°. En caso contrario, el siguiente caso al que pasa la estructura de casos es “Decidir 3”, cuya funcionalidad se puede ver en la figura 84.



**Figura 82: Caso “Decidir 3” de la estructura de casos del programa LabVIEW**

Si los datos recibidos son menores que 0,37 V, el color en el que se ha dado la reflexión es de color gris de tonalidad 3 y por tanto, el ángulo de paso de las aspas es de 18°. En caso contrario, el siguiente caso al que pasa la estructura de casos es “Decidir 4”, cuya funcionalidad se puede ver en la figura 85.

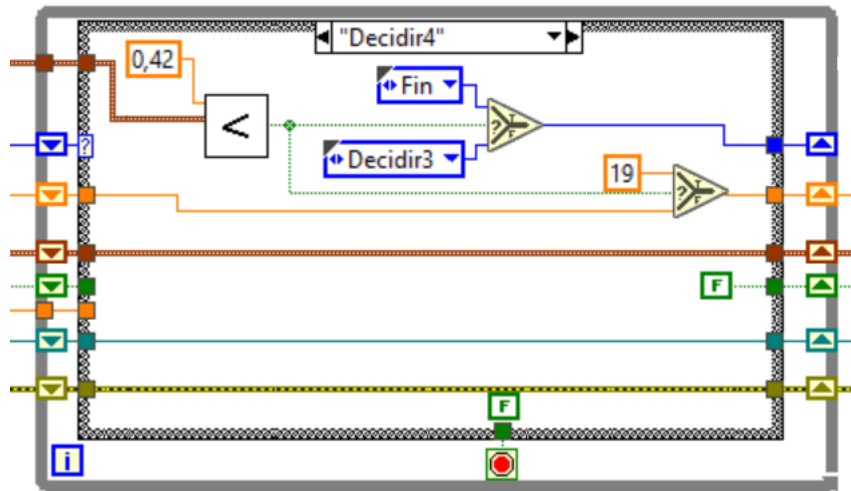


Figura 83: Caso "Decidir 4" de la estructura de casos del programa LabVIEW

Si los datos recibidos son menores que 0,42 V, el color en el que se ha dado la reflexión es de color gris de tonalidad 4 y por tanto, el ángulo de paso de las aspas es de  $19^\circ$ . En caso contrario, el siguiente caso al que pasa la estructura de casos es "Decidir 5", cuya funcionalidad se puede ver en la figura 86.

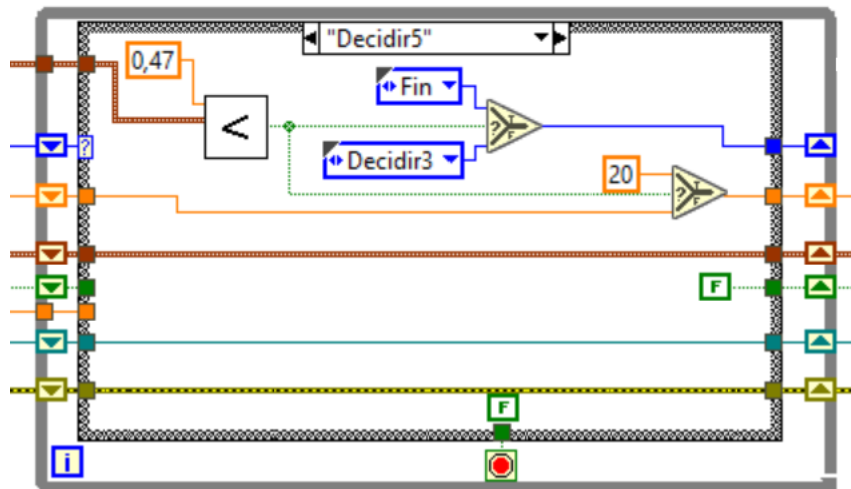


Figura 84: Caso "Decidir 5" de la estructura de casos del programa LabVIEW

Si los datos recibidos son menores que 0,47 V, el color en el que se ha dado la reflexión es de color gris de tonalidad 5 y por tanto, el ángulo de paso de las aspas es de  $20^\circ$ . En caso contrario, el siguiente caso al que pasa la estructura de casos es "Decidir 6", cuya funcionalidad se puede ver en la figura 87.

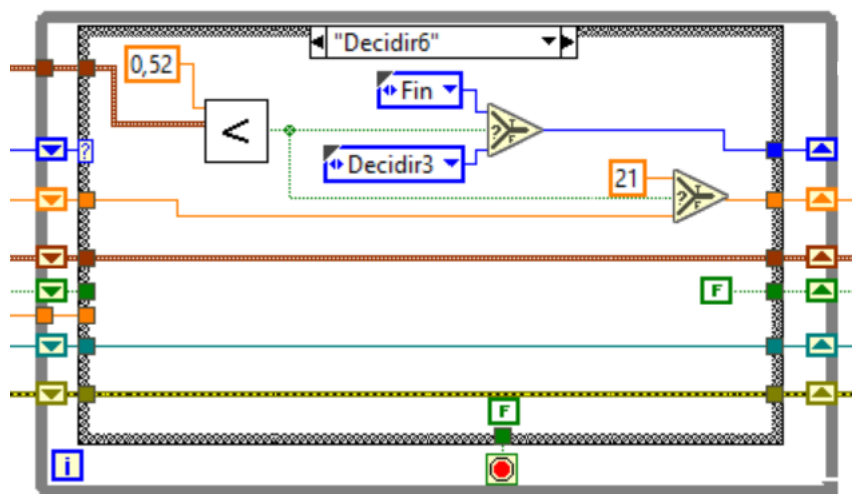


Figura 85: Caso "Decidir 6" de la estructura de casos del programa LabVIEW

Si los datos recibidos son menores que 0,52 V, el color en el que se ha dado la reflexión es de color gris de tonalidad 6 y por tanto, el ángulo de paso de las aspas es de 21°. En caso contrario, el siguiente caso al que pasa la estructura de casos es "Decidir 7", cuya funcionalidad se puede ver en la figura 88.

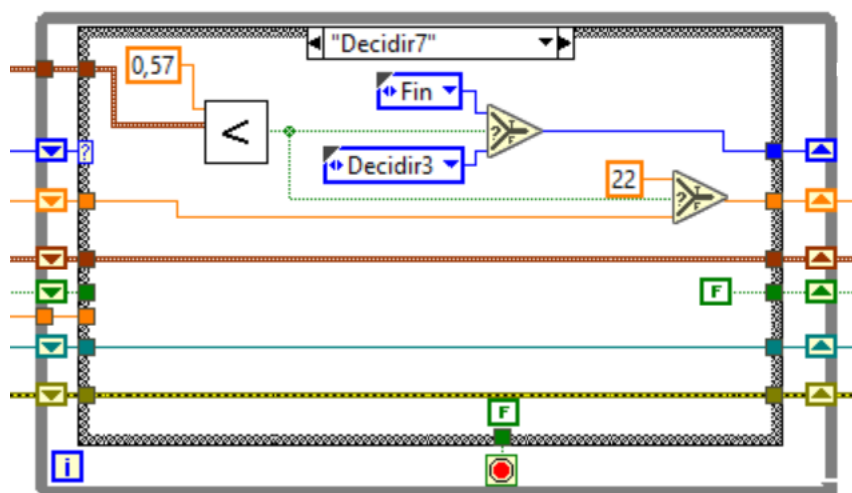


Figura 86: Caso "Decidir 7" de la estructura de casos del programa LabVIEW

Si los datos recibidos son menores que 0,57 V, el color en el que se ha dado la reflexión es de color gris de tonalidad 7 y por tanto, el ángulo de paso de las aspas es de 22°. En caso contrario, el siguiente caso al que pasa la estructura de casos es "Decidir 8", cuya funcionalidad se puede ver en la figura 89.



The screenshot shows a LabVIEW block diagram of a control system. On the left, there are several input lines with colored square icons: a blue line with a question mark, an orange line, a brown line, a green line, a teal line, and a yellow line. These lines enter a large rectangular frame. Inside the frame, the orange line passes through a gain block labeled '0,74' and then enters a summing junction (a square with a less-than sign). The green line also enters this summing junction. The output of the summing junction goes to a block labeled 'Decidir9'. The output of 'Decidir9' goes to a block labeled 'Fin'. The output of 'Fin' goes to another summing junction (a triangle with a less-than sign). The output of this second summing junction goes to a block labeled 'Decidir3'. The output of 'Decidir3' goes to a gain block labeled '24'. The output of the '24' gain block goes to a third summing junction (a triangle with a less-than sign). The output of this third summing junction goes to a block labeled 'F'. The output of 'F' goes to a block labeled 'F' (a green square with a red circle). The output of this block goes to a block labeled 'i' (a blue square with a white 'i'). The output of 'i' goes back to the input of the first summing junction, completing the feedback loop.

**Figura 88: Caso “Decidir 9” de la estructura de casos del programa LabVIEW**

109

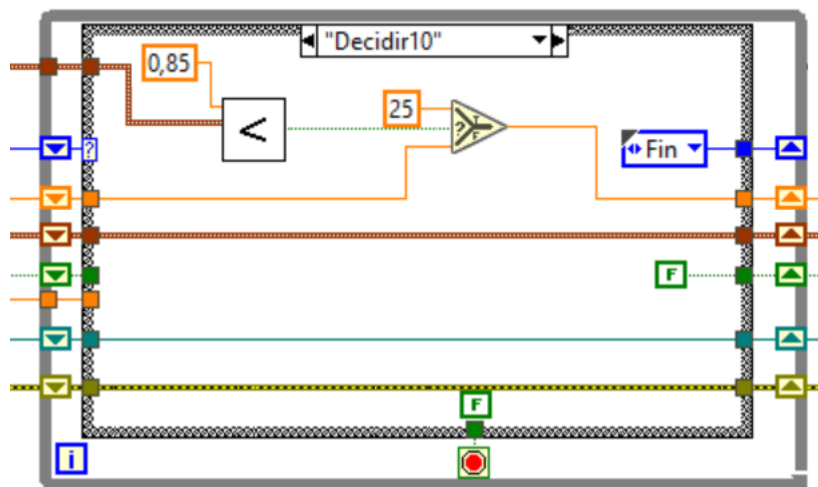


Figura 89: Caso “Decidir 10” de la estructura de casos del programa LabVIEW

Este caso es ligeramente diferente al resto. Si los datos recibidos son menores que 0,85 V, el color en el que se ha dado la reflexión es de color gris de tonalidad 10 y por tanto, el ángulo de paso de las aspas es de 25°. En caso contrario, el ángulo de paso será el último detectado.

#### 8.3.1.2.2. CASO “Negro”

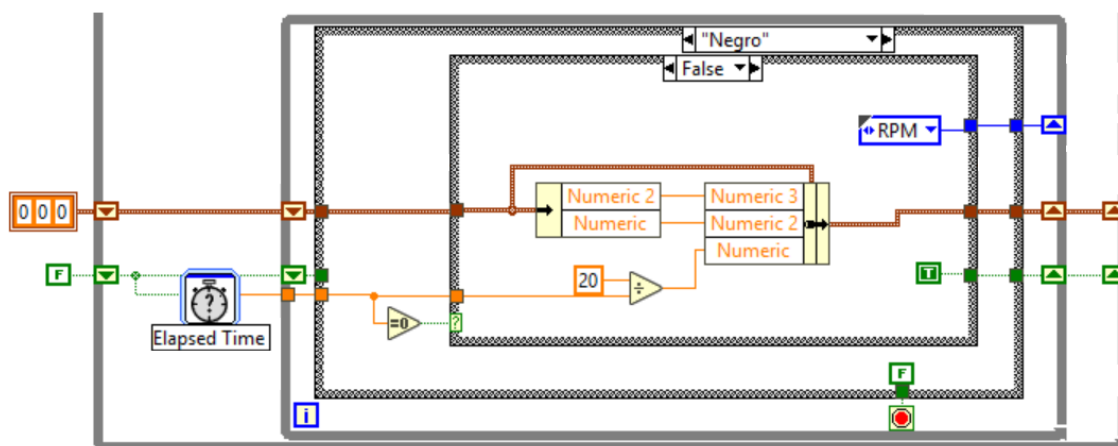


Figura 90: Caso “False” del caso “Negro” de la estructura de casos del programa LabVIEW

Si la comparación entre los valores recibidos por ZigBee y los distintos umbrales, nos indican que corresponden al color negro del encoder, la estructura de casos llegará al caso “Negro”, cuya funcionalidad se puede ver en la figura 92. En nuestro programa hemos creado otro “cluster” en la que vamos a almacenar los distintos resultados del cálculo de la velocidad angular. Cada vez que la reflexión se dé en una franja negra existente del encoder, calcularemos la velocidad de rotación. Sabiendo que hay 3 franjas negras, separadas entre sí  $120^\circ$  ( $2\pi/3$ ), podemos enunciar la ecuación 8.3. Para obtener el resultado en revoluciones por minuto, necesitamos formular la ecuación 8.4. Este resultado lo almacenaremos en dicho “cluster”.

$$Velocidad\ de\ rotación = \frac{2\pi/3}{t} [rad/s] \quad (8.3)$$

$$Velocidad\ de\ rotación = \frac{2\pi/3 [rad]}{t[s]} \cdot \frac{1[rev]}{2\pi[rad]} \cdot \frac{60[s]}{1[min]} = 20/t [rpm] \quad (8.4)$$

Para saber el tiempo que ha transcurrido desde que la luz reflejó en la franja negra anterior, hemos usado una función llamada "Elapsed Time". Cada vez que pase por una franja negra, se reseteará la función y volverá a contar el tiempo desde cero. Este es el único caso en el que el booleano que resetea la función "Elapsed Time" está en "True" y en el resto de casos está en "False". Para que el programa sea más robusto, si el tiempo transcurrido es nulo, no se vuelve a calcular la velocidad, sino que vuelve a tomar medidas. Esto está implementado en la figura 93.

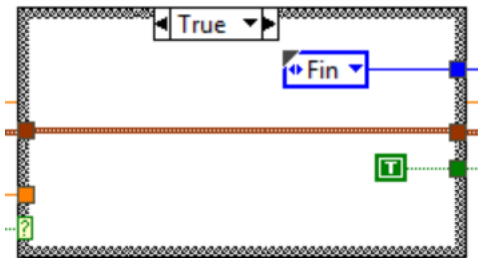


Figura 91: Caso "True" del caso "Negro" de la estructura de casos del programa LabVIEW

#### 8.3.1.2.3. CASO "RPM"

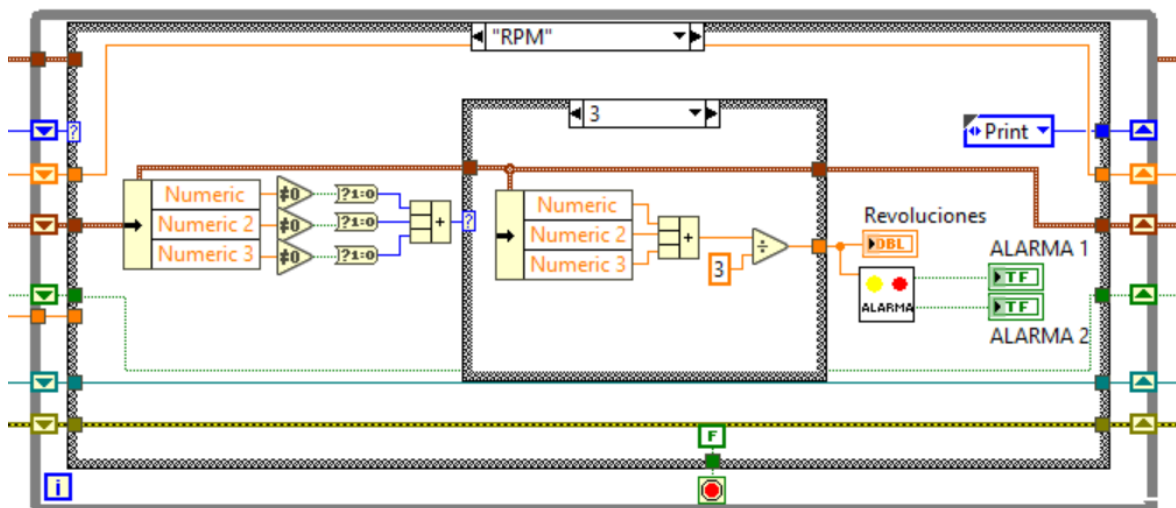


Figura 92: Caso "3" del caso "RPM" de la estructura de casos del programa LabVIEW

La figura 94 nos muestra el funcionamiento del caso "RPM" de la estructura de casos en la cual obtendremos la velocidad media de las últimas velocidades calculadas para darle robustez a la medida. Existen tres excepciones a este caso por lo que hemos creado una pequeña estructura de casos dentro de este caso. Los posibles casos son "0", "1", "2" y el que está representado en la figura 94, el caso "3". La primera vez que ejecutamos el programa, el "cluster" que contiene

las últimas velocidades angulares, tiene todos sus elementos inicializados en cero. Si se da este caso y no existe ningún valor en el “cluster”, la estructura pasará al caso “0”, y como podemos ver en la primera figura de la imagen 95, diremos que por ahora, la velocidad es nula.

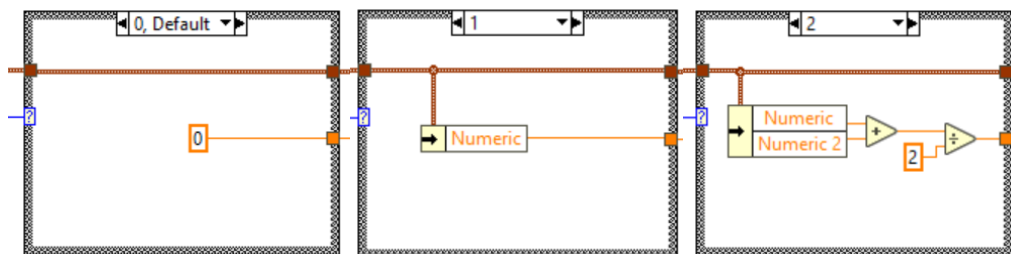


Figura 93: Caso “0”, “1” y “2” del caso “RPM” de la estructura de casos del programa LabVIEW

La segunda figura nos muestra el caso en el que sólo se tiene un dato de velocidad angular. Si este es el caso, no podemos hacer la media y diremos que la velocidad angular es esa simplemente. Por último, la figura de la derecha nos muestra el caso en el que ya se ha pasado dos veces por una franja negra del encoder y cabe la posibilidad de calcular su media. A partir de la tercera medida de reflexión en negro, se ejecutará siempre el caso “3” en el que se calcula la media de las últimas tres velocidades calculadas. Una vez que esta velocidad angular está calculada, el programa ejecuta un subVI, que hemos llamado “Alarmas”, cuyo icono podemos ver en la figura 98 teniendo una entrada numérica y dos salidas de tipo booleano.



Figura 94: Icono del subVI “Alarmas” usado en el programa LabVIEW

El panel frontal, representado en la izquierda de la figura 99, contiene un control correspondiente a la entrada y dos indicadores que corresponden a las salidas del subVI. En la parte derecha de la misma vemos el diagrama de bloques que define el comportamiento del subVI. En éste pretendemos comparar la velocidad calculada con los parámetros críticos que puede soportar la turbina del aerogenerador. Si la velocidad sobrepasa los 17 rpm, nos estamos alejando de la velocidad nominal a la que se genera mayor cantidad de potencia. En este caso, se iluminará el LED amarillo del panel de control (Alarma 1). Por otro lado, si la velocidad de rotación de las aspas de un aerogenerador sobrepasan las 23 rpm, la integridad de la turbina se podría ver afectada por lo que hay que pararla por completo. En este caso, se iluminará el LED rojo del panel de control (Alarma 2).



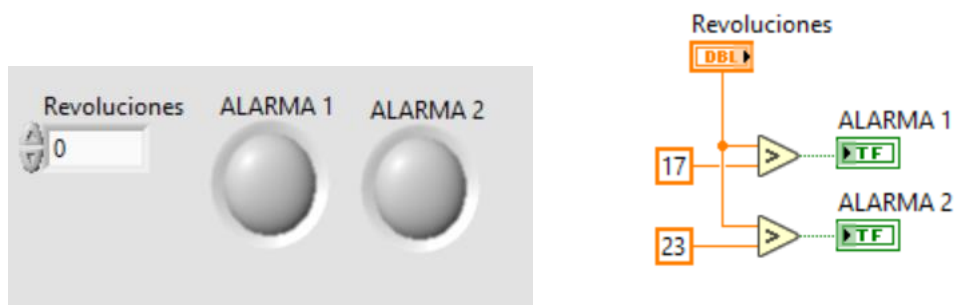


Figura 95: Panel de Control (izquierda) y Diagrama de Bloques (derecha) del subVI "Alarmas" usado en el programa LabVIEW

#### 8.3.1.2.4. CASO "Print"

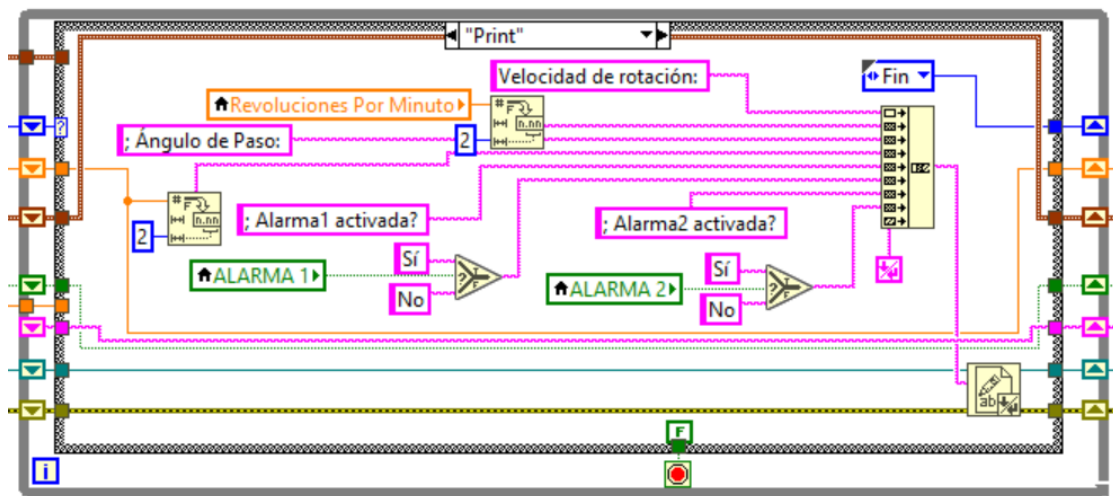


Figura 96: Caso "Print" de la estructura de casos en el programa LabVIEW

La figura 100 nos muestra las funciones del caso "Print" de la estructura de casos del programa LabVIEW. Lo que haremos en este caso es pasar todos los datos de interés, a un formato de escritura y agruparlos. Esta unión se escribirá en un documento de tipo ".txt". Para hacer un programa más legible, en lugar de pasar los datos de la velocidad de rotación y el estado de las dos alarmas mediante líneas, que podrían dar un aspecto confuso, hemos creado variables locales. Éstas nos permiten acceder a sus correspondientes indicadores, siempre y cuando su función se haya completado. Con todo esto, en el archivo se podrá leer: "Velocidad de rotación: X; Ángulo de paso: X; Alarma1 activada? Sí/No; Alarma2 activada? Sí/No"

Esto sólo ocurrirá una vez que el programa ha calculado la velocidad de rotación ya que es la única vez que se llama a este caso de la estructura de casos. La siguiente figura 101 podemos ver las funciones para poder escribir datos en un fichero ".txt".

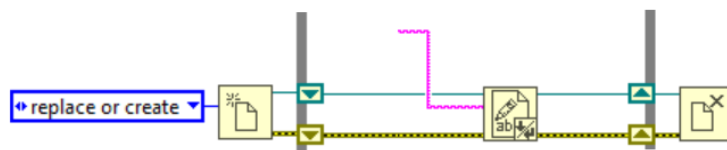


Figura 97: Funciones de Abrir/Cerrar ficheros de texto en LabVIEW

Primero abrimos el archivo donde queremos guardar los datos. Cada vez que se ejecute el programa nos preguntará la dirección del archivo donde queremos guardar la información. Después, escribimos el texto que hemos generado y, por último cerramos correctamente el fichero de texto. En la figura 102 podemos ver el texto generado durante una sesión de pruebas en el laboratorio.

Velocidad de rotación: 9,62; Ángulo de Paso: 23,00; Alarma1 activada? No; Alarma2 activada? No  
 Velocidad de rotación: 9,49; Ángulo de Paso: 23,00; Alarma1 activada? No; Alarma2 activada? No  
 Velocidad de rotación: 9,49; Ángulo de Paso: 23,00; Alarma1 activada? No; Alarma2 activada? No

Figura 98: Datos guardados en fichero .txt durante una sesión de pruebas en el laboratorio

#### 8.3.1.2.5. CASO “Fin”

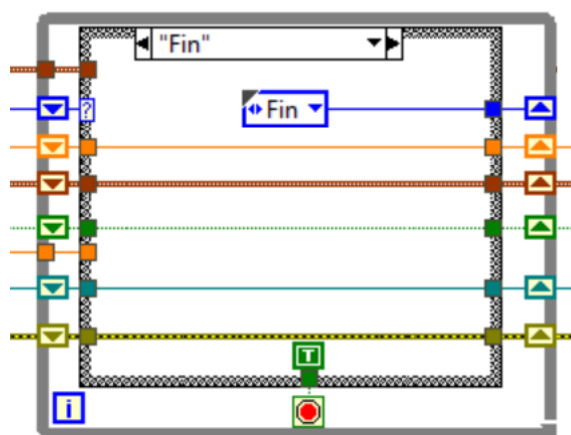


Figura 99: Caso “Fin” de la estructura de casos en el programa LabVIEW

La figura 103 nos muestra las funciones del caso “Fin” de la estructura de casos del programa LabVIEW. Una vez que se han ejecutado todos los casos de la estructura de casos, tenemos que finalizar el bucle. Si nos fijamos, es el único caso que puede parar el bucle en el que está contenida la estructura de casos mediante la variable “True”.

Gracias a la implementación que hemos diseñado, representada en la figura 104, el bucle externo que mantiene el programa funcionando, se parará si existe un error o se pulsa Stop. Los errores que pueden parar el programa es si se produce uno en el recurso VISA, tanto para establecer la comunicación serie, como leer un dato de esta o al cerrar el puerto. Adicionalmente, se pueden producir errores en las funciones relacionadas con los ficheros de texto. Adicionalmente, para poder saber el error que se produce durante la ejecución del programa, hemos juntado todas las posibles fuentes de error para que salgan los avisos.

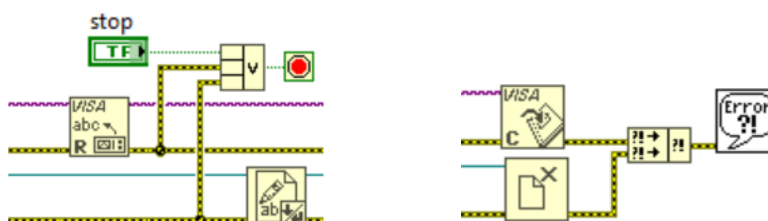


Figura 100: Casos en los que se para el programa (izquierda) y unión de errores en el programa LabVIEW

## 8.4. MEDIDAS OBTENIDAS

Una vez que la red punto a punto está configurada, hay que asegurarse de que, efectivamente, los dos módulos son capaces de comunicarse. Una de las ventajas de usar el programa XCTU es que dispone de una consola que muestra los mensajes que se envían y reciben. Con esto nos aseguramos de que los módulos Xbee no están dañados y que no se pierden datos durante la transmisión. En la izquierda de la figura 106 vemos el terminal correspondiente al módulo Xbee que hemos configurado como emisor y, en la derecha, el receptor. Aunque se han nombrado así a lo largo del proyecto, estos componentes establecen una red bidireccional. Se nombraron así para distinguir el módulo que se situaría cerca del FOS (emisor) y el que se situaría cerca del PC (receptor). En azul se representa el texto enviado y en rojo el recibido. Cabe destacar que el programa nos enseña primero la información en formato que podamos entender a simple vista, ASCII, y después esa misma información en hexadecimal.

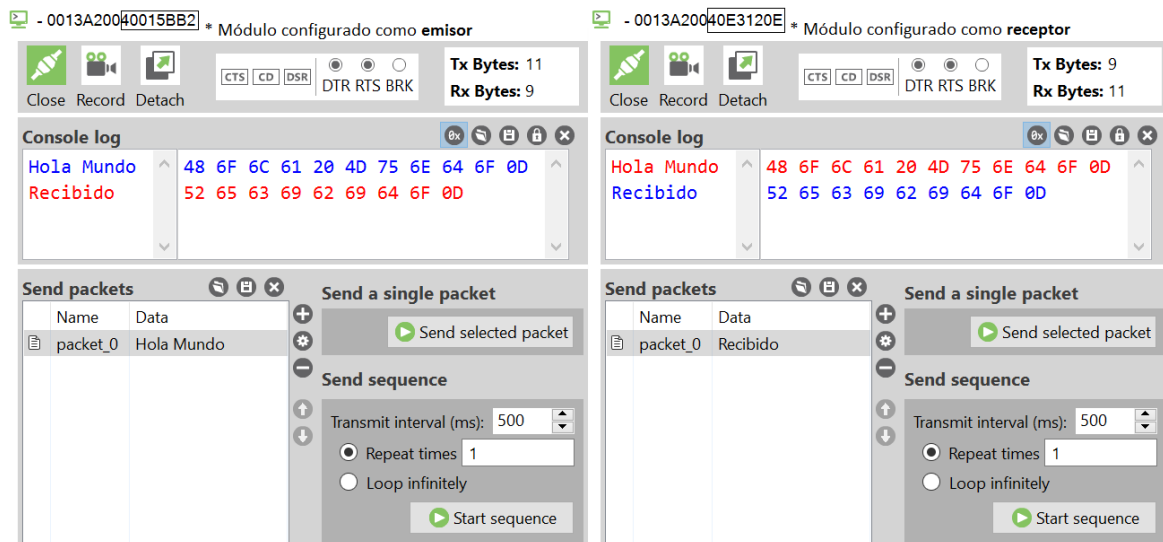


Figura 101: Consola XCTU que muestra datos enviados y recibidos por ambos módulos Xbee.

Para ver que, efectivamente, recibimos datos correctos en LabVIEW, hemos creado una gráfica que muestra los valores recibidos por el módulo emisor situado cerca del FOS. A su vez, tenemos un osciloscopio midiendo la tensión proporcionada por el driver receptor para poder comparar la información. La escala de tiempo se ha establecido así para poder observar cómo varía la tensión en un periodo de tiempo prolongado. El motor sobre el que está colocado el codificador diseñado gira a cierta velocidad angular y hace que el haz de luz emitido por el driver emisor refleje en franjas distintas del codificador. Esto hace que la potencia óptica absorbida por el driver receptor varíe y así varía también el voltaje de salida,  $V_o$ . Primero refleja en una franja de color negro, lo cual nos da una caída de tensión muy pronunciada. Seguidamente, el haz de luz refleja sobre la franja de escala de grises. En el caso de las siguientes imágenes, hemos hecho que el haz de luz refleje sobre el gris de tonalidad 7 que equivale a un ángulo de paso de las aspas del aerogenerador de  $23^\circ$ . El codificador sigue girando por lo que el haz de luz reflejará en una franja blanca que nos da el mayor nivel de tensión. En las siguientes imágenes comparamos la señal del osciloscopio con la señal generada en LabVIEW para distintas velocidades del motor.

En el primer caso, en la figura 107, la velocidad establecida es de 23 rpm que coincide con la velocidad máxima permitida en aerogeneradores. En este caso, ambas alarmas del programa LabVIEW diseñado deberían estar activadas, avisando así al usuario del peligro. En la figura 108, la velocidad del motor es de 17 rpm, que coincide con la velocidad que hemos establecido como límite de activación de la alarma 1. En la figura 109, la velocidad establecida del motor es de 10 rpm, una velocidad media a la que estaría funcionando normalmente un aerogenerador. Por último, la figura 110 corresponde a una velocidad de rotación de 5 rpm. En este caso, hacemos una comparación entre simular el movimiento con el uso del motor y el rodamiento que explicamos en el capítulo 5 “Descripción del sistema”. A esta velocidad, el motor de paso tiene poca precisión y hace que el codificador vibre y, por tanto, la reflexión de la luz no es óptima. Usando el rodamiento, la reflexión mejora considerablemente. En contraposición cabría destacar que la velocidad establecida es aproximada ya que no contamos con un mecanismo de control que nos asegure dicha velocidad.

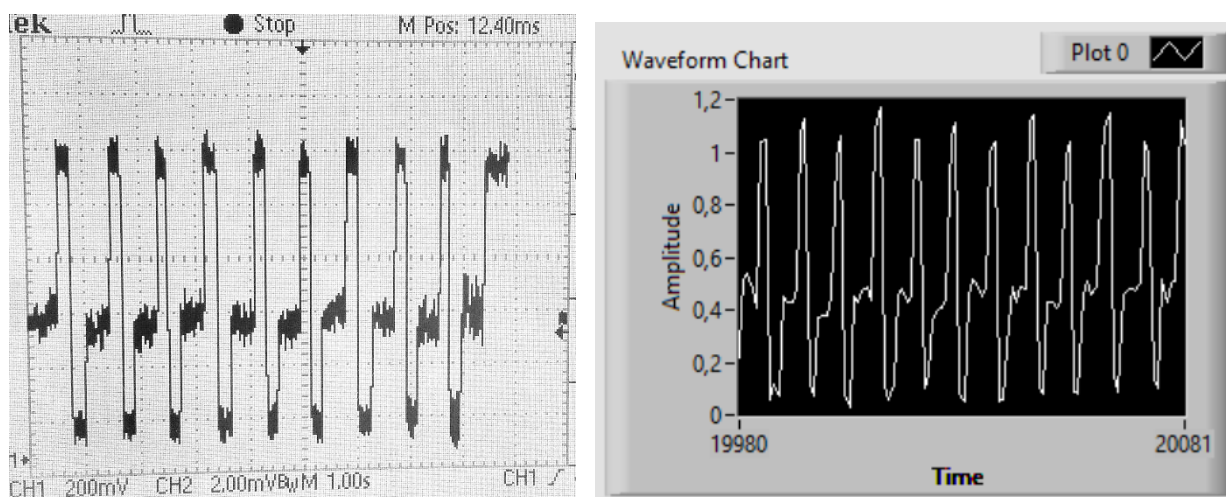


Figura 102: Comparación de la señal del osciloscopio (izquierda) y señal en LabVIEW (derecha) para una velocidad de rotación de 23 rpm.

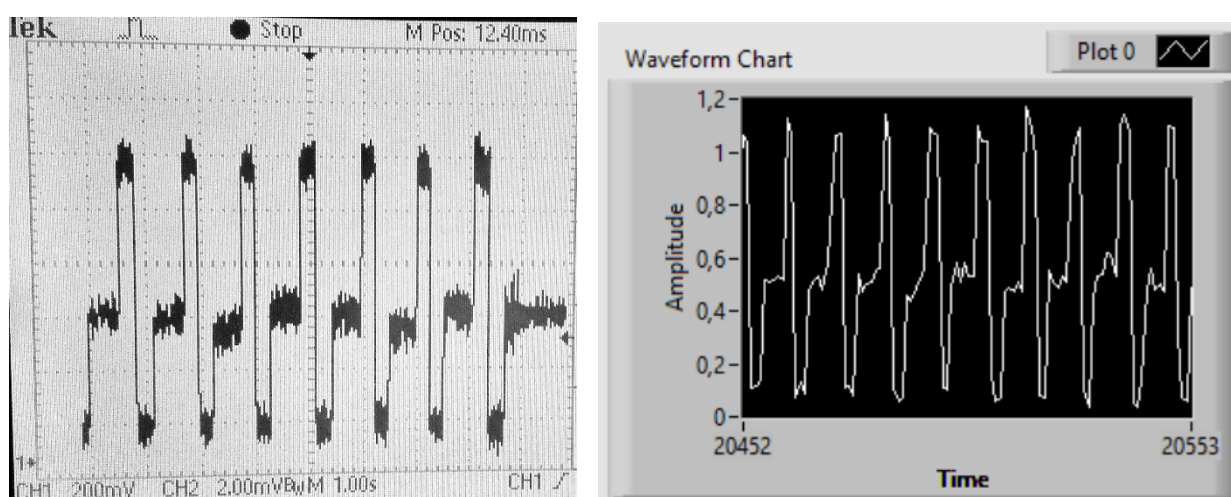


Figura 103: Comparación de la señal del osciloscopio (izquierda) y señal en LabVIEW (derecha) para una velocidad de rotación de 17 rpm.



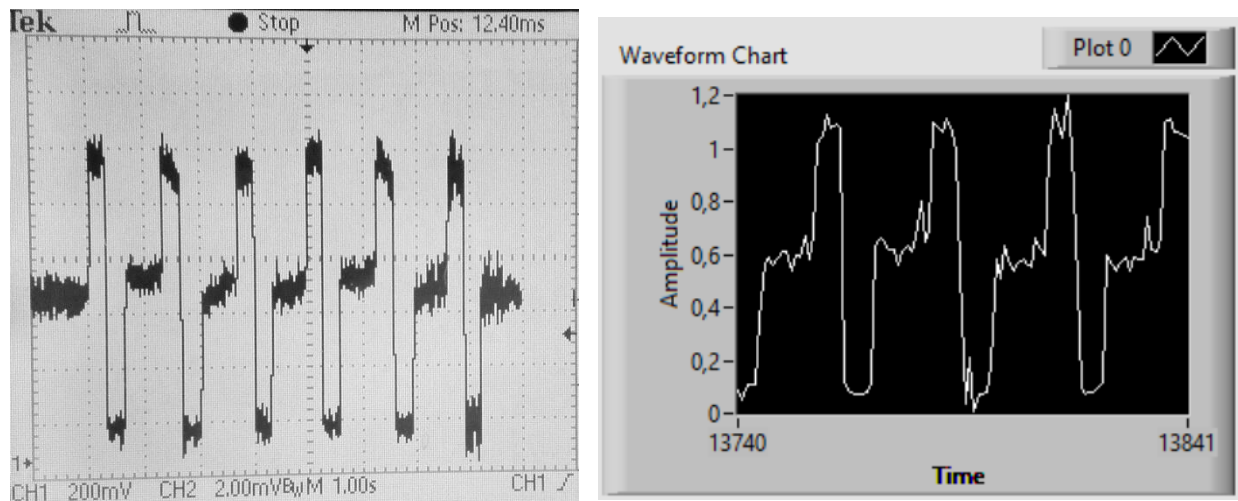


Figura 104: Comparación de la señal del osciloscopio (izquierda) y señal en LabVIEW (derecha) para una velocidad de rotación de 10 rpm.

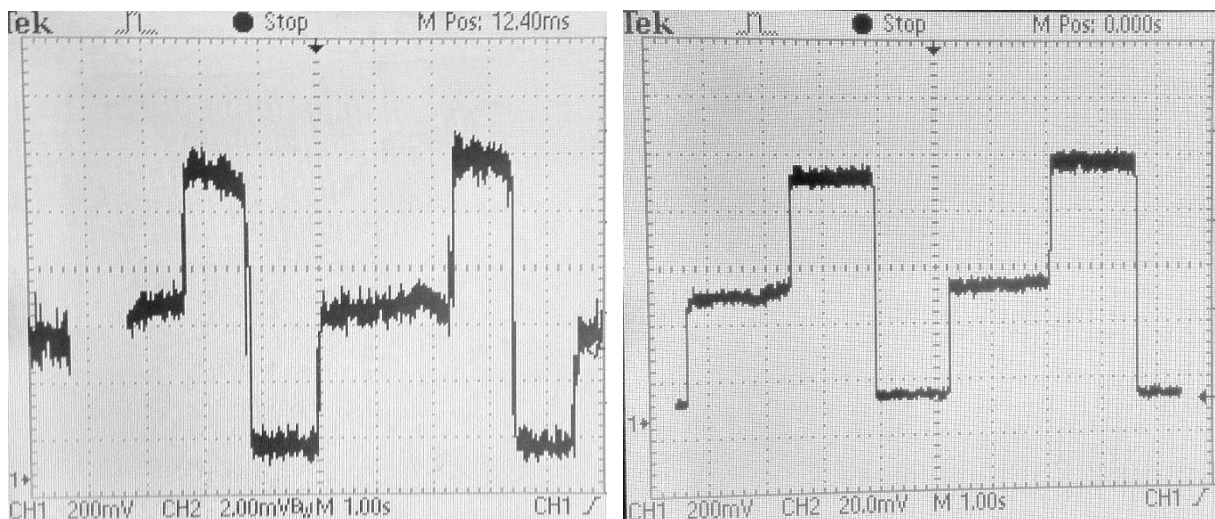


Figura 105: Comparación de la señal del osciloscopio simulando movimiento de 5 rpm con motor (izquierda) y rodamiento (derecha)

Como podemos ver en la figura 110 vemos claramente como usando el rodamiento como elemento de simulación del movimiento de un aerogenerador nos proporciona una señal con menos ruido que usando el motor. Teniendo esto en cuenta, la señal obtenida en LabVIEW se puede ver en la figura 111.

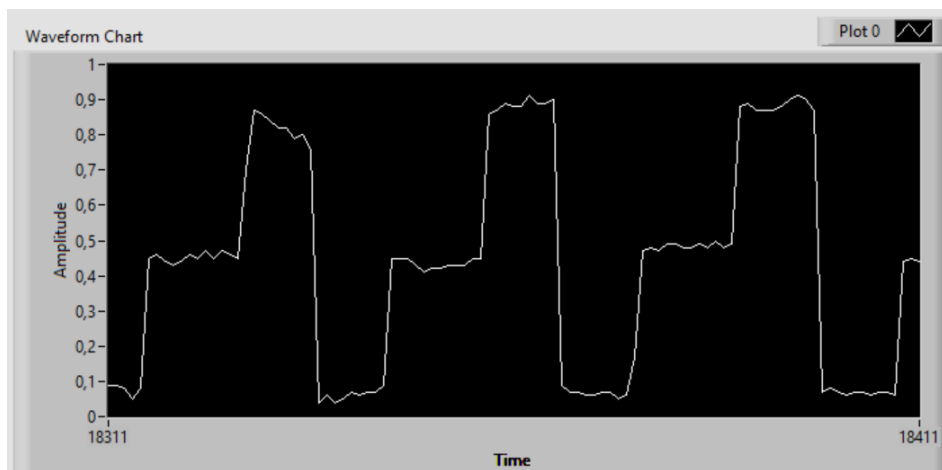


Figura 106: Gráfica de LabVIEW para una velocidad de rotación de 5 rpm generada con el rodamiento.

El modulo emisor envía los datos y ésta gráfica los une con una línea recta para representar la sucesión de puntos. De este modo, parece que la curva que describe no es homogénea sino que existen escalones entre los datos. Aun así, obtenemos la suficiente información y lo suficientemente rápida como para saber en qué tonalidad estamos reflejando. Como hemos visto, en el programa diseñado en LabVIEW, hemos creado un subVI llamado “Nuevo Cluster” para poder comparar tres medidas consecutivas con un umbral para evitar usar datos que no concuerdan con el nivel de tensión correspondiente al color de la franja del encoder donde se está produciendo la reflexión. Algunos de los errores que se pueden producir corresponden a que la lectura proporcionada por el sensor no es perfecta y puede proporcionar datos de dispersión que no concuerdan con el nivel de tensión que debería dar, pueden existir errores en la lectura analógica de la placa Arduino o durante el envío de datos entre los módulos Xbee. Con todo esto, cabría mencionar que el uso de este subVI puede dar lugar a ciertas desventajas. Como tenemos que comparar tres medidas consecutivas, si la velocidad de rotación es muy elevada, al sistema no le da tiempo a procesar la información. Si se quisiese obtener más datos, podemos aumentar la velocidad de envío del módulo emisor. Como vimos en el código Arduino, hemos incluido una función “`delay()`” de 100 ms. Este tiempo de espera se puede reducir o eliminar totalmente para proporcionar la velocidad máxima permitida por nuestro sistema. Esta velocidad viene limitada por la velocidad de lectura de una entrada analógica de una placa Arduino UNO que es de 100 microsegundos. La velocidad máxima de envío de datos, por tanto es de 10.000 datos por segundo. En todos los casos, e incluso con la máxima velocidad permitida de los aerogeneradores, el sistema mide correctamente la velocidad de rotación. En el último caso que hemos visto, al usar un rodamiento, no sabemos exactamente a qué velocidad gira el encoder. En este caso, el programa diseñado en LabVIEW midió una velocidad entre los 6 y 7 rpm.

En contraposición, cuando la velocidad es muy reducida, por debajo de las 5 rpm, se producen algunos errores cuando el sistema funciona como giróscopo óptico. En la zona de cambio entre colores, la transición entre niveles de tensión no es inmediata y el sensor nos puede proporcionar valores entre medias. En la figura 112, vemos los resultados obtenidos durante

una sesión de laboratorio a una velocidad por dejado de las 5 rpm (simulado con el rodamiento). Adicionalmente cabría destacar que el sistema implementado es muy sensible cuando funciona como giróscopo. Como vimos en el capítulo 7, “Diseño y desarrollo del Encoder Óptico”, según la distancia a la que se coloque la fibra óptica de la superficie de reflexión, el receptor recibirá más luz. Esta distancia tiene un punto en la que el voltaje recibido es máximo y después desciende de nuevo. Como vemos en la gráfica 6, entre los 2 y 4 mm, la tensión de salida varía notablemente. Por este motivo, si el codificador se tambalea, la distancia de reflexión varía ligeramente y aunque esta variación sea pequeña, la tensión de salida se verá modificada. Durante las comprobaciones experimentales nos dimos cuenta de que el encoder usado en la implementación del sistema podía inclinarse ligeramente y los rangos establecidos para cada tonalidad de gris se solapaban. Por lo tanto, a la hora de implementar el sistema, el montaje tiene que ser exacto. Aunque se fijen los extremos de la POF, hay que asegurarse de que la superficie en la que se coloca el encoder sea estable.

```

Ángulo de Paso: 0,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 22,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 22,00;
Ángulo de Paso: 25,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 16,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 25,00;
Ángulo de Paso: 22,00;
Ángulo de Paso: 23,00;
Ángulo de Paso: 23,00;

```

Figura 107: Datos del ángulo de paso obtenidos durante una sesión de laboratorio con el programa LabVIEW diseñado para una velocidad menor de 5 rpm

Cuando comienza el programa, al no tener suficiente información, no puede determinar el ángulo de paso de las aspas y lo deja con el valor con el que se inicializa, 0. Como podemos ver, el programa es capaz de detectar la tonalidad de gris en la que refleja el haz de luz y lo relaciona con un ángulo de paso las aspas de 23°, como lo hemos calibrado. En la figura 112, podemos varios valores marcados ya que no deberían haber sido detectados por el programa. En primer lugar, en naranja, vemos un error de medida de 1°. Esto se puede deber a que el haz de luz no ha reflejado en el lugar exacto o que la superficie en la que se encuentra el encoder se mueva ligeramente. De cualquier forma, el error se puede considerar aceptable. Por otro lado, en rojo

hemos marcado valores que se alejan del dato esperado. Estos casos corresponden a la tonalidad de gris más oscura ( $16^\circ$ ) y la más clara ( $25^\circ$ ). Esto se debe a que, antes de que la estructura de casos que hemos diseñado entre en el caso “Negro”, detecta otras tonalidades de gris, producidas por el cambio de nivel de tensión. La transición de nivel de tensión es más lenta y grava en el fichero txt el último dato de ángulo de paso registrado.

Por último, mencionar que uno de los errores más frecuentes que nos ha aparecido en LabVIEW es la saturación del buffer del módulo Xbee receptor. Si dejamos el módulo emisor funcionando sin ejecutar el programa LabVIEW, se acumula la información sin que sea leída. Esto tiene sencilla solución ya que simplemente con liberar el buffer, se puede ejecutar normalmente el programa.



## CAPÍTULO 9: PRESUPUESTO

El presente presupuesto realiza una estimación aproximada del coste de ejecución del sistema propuesto para un usuario. En él se consideran tanto el coste del material del sistema, la instrumentación y los equipos informáticos, como el coste del personal implicado en su desarrollo.

### MATERIAL DEL SISTEMA

<u>Nº</u>	<u>Ud.</u>	<u>Descripción</u>	<u>Precio</u>	<u>Importe</u>
1	Ud.	Resistencia de 50,1Ω, 1/4 W tolerancia 5%.	0,02	0,02
2	Ud.	Resistencia de 1 KΩ, 1/4 W tolerancia 5%.	0,02	0,04
2	Ud.	Resistencia de 1,2 KΩ, 1/4 W tolerancia 5%.	0,02	0,04
1	Ud.	Resistencia de 4,3 MΩ, 1/4 W tolerancia 5%.	0,02	0,02
1	Ud.	Transistor bipolar npn de la marca Motorola, modelo BJT BC547, con corrientes máximas de 100 mA y potencia máxima de 625 mW.	0,10	0,10
2	Ud.	Amplificador operacional de la marca ST microelectronics, modelo TL081, con rangos de tensiones de -15 V a +15 V de entrada y de -18 V a +1 V de alimentación y potencia máxima de 680 mW.	0,20	0,40
1	Ud.	Emisor óptico de la marca Industrial Fiber Optics, modelo IF-E97, de 660 nm de longitud de onda y corrientes de hasta 40 mA con conector de cable estándar de fibra óptica de plástico con un núcleo de 1 mm y una cubierta de 2,2 mm.	3,00	3,00
1	Ud.	Fotodetector de la marca Industrial Fiber Optics, modelo IF-D91, con rango espectral de operación que va de los 450 a los 1050 nm y con conector de cable estándar de fibra óptica de plástico con un núcleo de 1 mm y una cubierta de 2,2 mm.	3,00	3,00
6	m	Fibra Óptica de Plástico multimodo de salto de índice con un núcleo de 1 mm y una cubierta de PBT de 2,2 mm.	1,00	6,00
1	Ud.	Encoder Óptico de material reflexivo con tres franjas negras, tres franjas blancas y tres franjas de escala de grises con diez tonalidades distintas con conector al eje lento de un aerogenerador y el ángulo de paso de las aspas del mismo.	85,00	85,00
2	Ud.	Placa de circuito impreso de la marca Arduino, modelo UNO, con microcontrolador ATmega328, conector USB estándar tipo B hembra y conector de alimentación externa de 9 V.	36,00	72,00
2	Uds.	Módulo transreceptor de comunicación inalámbrica por radiofrecuencia estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee) de la marca	30,00	60,00

		DIGI International, modelo Xbee Serie 1, de 25 mm <sup>2</sup> , 1 mW de potencia y 40 mA de corriente de operación.		
2	Uds.	Placa de expansión de la marca Arduino, modelo Xbee Shield, con jumpers selectores posición "Xbee" y "USB".	14,00	28,00

**Total Presupuesto Parcial: Material del Sistema** **257,62**

#### INSTRUMENTACIÓN

<u>Nº</u>	<u>Ud.</u>	<u>Descripción</u>	<u>Precio</u>	<u>Importe</u>
1	Ud.	Fuente de alimentación de la marca Thurlby Thandar Instruments, modelo EL302Tv, con dos salidas de 0 a 30 V, una salida de 1,5 a 5 V y corrientes de 0 a 2 A.	417,00	417,00
1	Ud.	Multímetro de la marca Amprobe, modelo 37XR-A, con corrientes máximas de 10 A (AC) y 750 V (AC).	177,00	177,00
1	Ud.	Osciloscopio digital de la marca Tektronix, serie TBS1000B, modelo TBS1032B, con ancho de banda de 30MHz y 2 canales analógicos con una tasa de muestreo 500MS/s.	450,00	450,00
1	Ud.	Fuente de alimentación DC con conector Jack 5,5 X 2,1 mm	5,00	5,00
<b>Total Presupuesto Parcial: Instrumentación</b>				<b>1.049,00</b>

#### EQUIPOS INFORMÁTICOS Y SOFTWARE INFORMÁTICO

<u>Nº</u>	<u>Ud.</u>	<u>Descripción</u>	<u>Precio</u>	<u>Importe</u>
1	Ud.	Ordenador de sobremesa.	600,00	600,00
2	Ud.	Cable USB estándar tipo B.	4,00	8,00
1	Ud.	Entorno de desarrollo de Arduino, IDE (Integrated Development Environment).	0,00	0,00
1	Ud.	Software de configuración y testeo de módulos de radiofrecuencia de DIGI International, XCTU.	0,00	0,00
1	Ud.	Licencia del software de desarrollo de sistemas de National Instruments, LabVIEW 2016.	3.623,00	3.623,00
<b>Total Presupuesto Parcial: Equipos y Software Informático</b>				<b>4.231,00</b>

#### PERSONAL

<u>Nº</u>	<u>Ud.</u>	<u>Descripción</u>	<u>Precio</u>	<u>Importe</u>
300	h	Ingeniero Industrial Junior sin experiencia.	9€/h	2.700,00
100	h	Ingeniero Senior como tutor de proyecto.	15€/h	1.500,00
<b>Total Presupuesto Parcial: Personal</b>				<b>4.200,00</b>

## TOTAL DE LA EJECUCIÓN

<u>Descripción</u>	<u>Importe</u>
Material del Sistema	257,62
Instrumentación	1.049
Equipos informáticos	4.231
Personal	4.200
<b>TOTAL EJECUCIÓN:</b>	<b>9.737,62</b>
<b>21% IVA:</b>	<b>2.044,90</b>
<b>TOTAL:</b>	<b>11.782,52</b>

El presupuesto total de este Trabajo de Fin de Grado asciende a: **11.782,52 €** (once mil setecientos ochenta y dos euros con cincuenta y dos céntimos).

## CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras la ejecución del proyecto se ha diseñado y desarrollado un sensor óptico (encoder óptico) de intensidad, basado en la reflexión de la luz al incidir sobre una superficie, capaz de medir la velocidad de giro y ángulo de paso de las palas en aerogeneradores, dentro de sus rangos de interés y/o aplicabilidad. El sistema permite la interrogación remota de dicho sensor de manera centralizada desde una oficina central, empleando para ello tecnología ZigBee para comunicaciones inalámbricas, controlando la monitorización de manera remota a través de LabView.

Podemos concluir que el diseño del sistema se compone de un sensor de fibra óptica (FOS) y su posterior interrogación remota para la monitorización de los parámetros objetivo. El FOS diseñado se comporta como un giróscopo óptico y es capaz de medir la velocidad de rotación del objeto al que se une. Los datos son enviados inalámbricamente usando el protocolo de comunicación inalámbrica ZigBee y el usuario puede interactuar y observar remotamente cómo los datos son actualizados en tiempo real gracias a un programa diseñado en LabVIEW,

La elección del LED empleado en el FOS se reduce en decidir una longitud de onda que optimice las pérdidas de inserción del esquema sensor propuesto que coincide con una longitud de onda alrededor de los 650 nm. Para el driver emisor hemos diseñado un circuito que mantenga el LED configurado a un punto de potencia media estable fijando la corriente que circula por él. Esta corriente se ajusta con la resistencia  $R_E$  que debe comprenderse desde los 47,5  $\Omega$  a los 140  $\Omega$  para asegurar el correcto funcionamiento del transistor, es decir, que su región de funcionamiento sea la región activa. El valor final establecido para  $R_E$  es de 50,1  $\Omega$  que nos proporciona una potencia óptica emitida de 352,7  $\mu\text{W}$ . Por otro lado, el circuito del driver receptor es un amplificador de transimpedancia que nos da la información del FOS en niveles de tensión. Esta salida depende de las pérdidas de potencia óptica totales que a su vez determinan el factor de ganancia a diseñar para la etapa de transimpedancia usada. Tras varias comprobaciones experimentales se pudo concluir que las pérdidas de potencia óptica totales ascienden a unos 20 dB aproximadamente por lo que se diseñó una resistencia de realimentación adecuada para conseguir una lectura clara del voltaje de salida. El haz de luz emitido por el driver emisor será guiado por una POF hasta reflejar en un encoder que hemos diseñado para que el sistema se pueda comportar como giróscopo óptico y, adicionalmente, pueda calcular la velocidad de rotación del objeto al que se une. Como hemos visto, para reducir las pérdidas de potencia óptica, la distancia de reflexión tiene que darse a los 3mm de la superficie. Este factor es determinante ya que, como deducimos de las medidas obtenidas, cualquier variación de esta distancia hará que el receptor obtenga menos luz. Por lo tanto, a la hora de implementar el sistema, el montaje tiene que ser exacto. Aunque se fijen los extremos de la POF, hay que asegurarse de que la superficie en la que se coloca el encoder sea estable.

Tras realizar una gran cantidad de medidas, se estableció un rango de voltajes para cada color del encoder. Este rango de voltajes nos ayudó a diseñar un programa en LabVIEW capaz de detectar franjas negras, que nos dan caídas de tensión abruptas, para contar pulsos y así medir la velocidad de rotación del encoder. Adicionalmente, relacionamos cada tensión proporcionada por una tonalidad de gris con los grados de paso de las aspas del aerogenerador. Esto último requiere una calibración que relacione al ángulo que queremos medir con cada tonalidad de gris del encoder.

Para poder enviar los parámetros de interés proporcionados por el FOS usaremos el protocolo de comunicación ZigBee estableciendo una comunicación punto a punto mediante un módulo emisor (nodo sensor), y un módulo receptor que se encuentra conectado al PC (nodo central). Cada módulo consta de una placa Arduino UNO y un módulo Xbee. Ambos componentes están conectados entre sí mediante una placa de expansión conocida como "Xbee Shield" y permite conectar el módulo Xbee a la comunicación en serie entre el microcontrolador "ATMEGA328" de la placa Arduino y el cable USB. Primero, la placa Arduino del módulo emisor lee el nivel de tensión proporcionado por el FOS a través de una de sus entradas analógicas y envía esta información por el puerto serie. El módulo está configurado con los jumpers de la "Xbee Shield" en la posición Xbee, en la cual el pin  $D_{OUT}$  del módulo Xbee está conectado al pin Rx (entrada) del microcontrolador y el pin  $D_{IN}$  está conectado al pin Tx (salida) del microcontrolador. De esta manera, en el código Arduino diseñado, podemos emplear la función ampliamente usada que muestrea los datos en el monitor serie ya que esta información se enviará al otro módulo Xbee de forma inalámbrica. El módulo receptor está conectado a un PC, emulando la localización remota de una oficina o central de control y usa un programa diseñado en LabVIEW para el que el usuario puede interactuar y observar cómo los datos son actualizados en tiempo real. Para poder transmitir los datos recibidos por módulo Xbee al PC tenemos que establecer una comunicación serie entre ellos. Para ello, los jumpers selectores de la "Xbee Shield" deben estar en posición USB y, adicionalmente, quitar el microcontrolador "ATMEGA328" de la placa Arduino. De esta manera conseguimos que el pin  $D_{OUT}$  del módulo Xbee esté conectado al pin Rx del convertidor USB-serie que contiene el cable USB y, el pin  $D_{IN}$  en el módulo Xbee está conectado al pin Tx del convertidor USB-serie.

Como vimos en los objetivos del sistema, el producto debe tener un coste reducido para que tenga competitividad de mercado y, en nuestro caso, los costes de material corresponden a 180,80 €, en el que el material más costoso corresponde al empleado en la interrogación remota. Aunque el presupuesto es reducido, al usar el programa LabVIEW, los costes aumentan al tener que comprar la licencia de dicho programa. El presupuesto, por tanto, podría variar si el cliente tiene previamente una licencia de LabVIEW.

En la góndola de un aerogenerador, existen numerosos dispositivos que contribuyen al correcto funcionamiento de la turbina y emiten interferencias electromagnéticas. Por este motivo, el empleo de un sensor óptico, donde la información modula algún parámetro físico de interés sobre la luz, ha sido una de las propuestas o prerrequisitos fundamentales en la definición del principio de funcionamiento del sensor. Adicionalmente, mediante el empleo de fibra óptica de

plástico se permite enviar y recoger la luz tras el proceso de transducción de una manera eficiente, minimizando los efectos de dichas interferencias sobre la señal de información, sin requerir personal altamente cualificado para su manipulación. Por otra parte, el uso de comunicación inalámbrica mediante ZigBee es muy adecuado puesto que evita diseñar un sistema o red totalmente cableada y proporciona una alta escalabilidad a la hora de añadir nuevos nodos a la red, es decir, nuevos aerogeneradores a un parque eólico que monitorice el estado de los mismos de una manera centralizada. Para trabajos futuros, podríamos plantearnos una red ZigBee de todos los dispositivos presentes que nos den parámetros relevantes. Así se crearía una red punto multipunto en el que el coordinador sería el módulo conectado al ordenador de una oficina o central de control. Aunque los módulos Xbee empleados son de consumo reducido, existen otros modelos, como los Xbee Series 2, que pueden entrar en modo bajo consumo, en inglés conocido como “sleep mode”, para ahorrar batería. El coordinador, el dispositivo conectado al PC, puede mandar órdenes a los distintos dispositivos finales para que éstos manden la información almacenada al PC. En la posible red punto-multipunto, esto tendría mucho sentido pero, en nuestro caso, no lo hemos implementado porque necesitamos que el módulo emisor nos mande la información del FOS constantemente. Adicionalmente, hemos alimentado este módulo emisor con una pila convencional. Si se llegase a implementar en una turbina, se puede aprovechar el sistema de alimentación del resto de dispositivos. Si no fuese posible, entre otras opciones, se podría conectar a una pila alimentada por una pequeña placa fotovoltaica para evitar mantenimientos periódicos por reemplazo de baterías.

Podemos introducir más tonalidades en el encoder diseñado para poder distinguir más niveles de gris. Para poder discernir cada rango de voltaje sin que se solapen, podemos hacer modulación de la luz emitida por el driver emisor para eliminar la onda de 100 Hz que hemos visto que se nos acopla, correspondiente a la luz ambiente del laboratorio. Como dijimos, en los tonos más claros tenemos que dejar una diferencia de 40 mV la cual se podría reducir haciéndonos uso de la modulación. La etapa de acondicionamiento necesaria se puede encontrar en el capítulo 6 titulado “Drivers”. Para evitar posibles fluctuaciones de potencia en la fuente y asegurar mediciones precisas, se debe implementar un canal de referencia de medida de potencia óptica de manera continuada, de tal manera que se asegure que la magnitud óptica de interés únicamente se deba a cambios sufridos por la magnitud física a medir. Esta técnica se conoce como auto-referencia. En los test de laboratorio se comprobó que la potencia óptica de emisión del LED cambiaba de manera no significativa con el tiempo, pero en un despliegue real del sistema sensor en un aerogenerador esta consideración debería ser tomada en cuenta.

Nuestro sistema tiene aplicación en otros campos aunque nosotros lo hemos enfocado al uso en aerogeneradores. En el campo de la aviación se podría usar para medir la velocidad de rotación de la hélice y medir el ángulo de paso de las alas del avión. Existen distintas posiciones de las alas en el despegue y aterrizaje que necesitan ser medidos con precisión.

## CAPÍTULO 11: BIBLIOGRAFÍA

**[Gpeace]** Greenpeace España.

<<http://www.greenpeace.org/espana/es/Trabajamos-en/Frenar-el-cambio-climatico/Impactos/>>

**[R2050]** Estudio realizado por Greenpeace España con el Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas: *“Renovables 2050: El potencial de las energías renovables en la España Peninsular”*, 2010.

<<http://www.greenpeace.org/espana/es/reports/renovables-2050/>>

**[Acciona]** Acciona. Líder Mundial en Energía Renovable e Infraestructuras.

<<http://www.acciona.com/es/>>

**[DWIA]** Danish Wind Industry Association.

<<http://www.windpower.org/en>>

**[ZubiaArrue]** Joseba Zubia y Jon Arrue, *“Plastic Optical Fibres: An Introduction to Their Technological Processes and Applications”*, Optical Fiber Technology, 7(2), pp 101–140, 2001.

**[PFC-Guioimar]** Laura Guioimar Valverde Marín y David Sánchez Montero, *“Técnica de Medida con Auto-referencia para Sensores Ópticos de Intensidad Mediante Procesado Digital de Señal e Instrumentación Virtual”*, proyecto de final de carrera de la Universidad Carlos III de Madrid, departamento de tecnología electrónica, Junio 2012.

**[LFW]** Laser Focus World. Revista mensual que cubre los últimos avances mundiales en fotónica y optoelectrónica.

<<http://www.laserfocusworld.com/articles/2012/06/automotive-fiber-automobiles-make-the-most-use-of-plastic-optical-fiber.html>>

**[IFO]** Industrial Fiber Optics.

<<http://www.i-fiberoptics.com/>>

**[FOA]** The Fiber Optic Association.

<[http://www.thefoa.org/ESP/Fibra\\_optica.htm](http://www.thefoa.org/ESP/Fibra_optica.htm)>

**[PFC-Pérez]** Javier Pérez Fernández y Dra. Carmen Vázquez García, *“Medida del perfil de índice de refracción en fibra óptica mediante el método de reflexión”*, proyecto de final de carrera de la Universidad Carlos III de Madrid, departamento de tecnología electrónica, Junio 2014.

**[DavidSM]** David Sánchez Montero y Dra. Carmen Vázquez García, *“Coarse WDM passive optical networking of self-referenced fibre-optic intensity sensors with reconfigurable characteristics”*, Tesis de Master de la Universidad Carlos III de Madrid, departamento de tecnología electrónica, Julio de 2010

**[LuNéJRo]** Lúcia Bilro, Nélia Alberto, João L. Pinto y Rogério Nogueira, “*Optical Sensors Based on Plastic Fibers*”, *Sensors*, 12(9), pp 12.184-12.207, 2012.

**[Udda]** Eric Udda, “*An overview of fiber-optic sensors*”, *Review of Scientific Instruments*, 66(8), pp 4.015-4.030, 1995.

**[NI-FBG]** Análisis de sensores ópticos FBG (Fiber Bragg Grating) por National Instruments.

<<http://www.ni.com/white-paper/11821/es/>>

**[wikiFBG]** Entrada de Fiber Bragg Grating en Wikipedia.

<[https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber\\_Bragg\\_grating](https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating)>

**[ALAVAing]** Presentación realizada por ALAVA Ingenieros, empresa de distribución de instrumentación y sistemas de tecnologías avanzadas en España y Portugal. “*Tecnología de fibra óptica y su aplicación a la monitorización de estructuras civiles*”.

<[www.alava-ing.es/repositorio/0103/pdf/1103/2/presentacion-fibra-optica.pdf?d=1](http://www.alava-ing.es/repositorio/0103/pdf/1103/2/presentacion-fibra-optica.pdf?d=1)>

**[AugustoLópez]** Carlos Augusto Galindez-Jamioy y José Miguel López Higuera, “*Brillouin Distributed Fiber Sensors: An Overview and Applications*”, *Hindawi*, 204121, pp 17, 2012.

<<https://www.hindawi.com/journals/js/2012/204121/>>

**[Dons]** DonsNotes Home Page.

<<http://donsnotes.com/tech/em-spectrum.html>>

**[Bluetooth]** Bluetooth.

<<https://www.bluetooth.com/>>

**[decom]** Página oficial de la Universidad Federal de Ouro Preto, Brasil. Departamento de informática.

<<http://www.decom.ufop.br/decom/inicio/>>

**[WiFi]** WiFi Alliance.

<<http://www.wi-fi.org/>>

**[Tkomb]** Transiskom: Blog of Computer Science and Technology.

<<http://www.transiskom.com/2012/10/pengertian-wireless-distribution-system.html>>

**[ZigBee]** ZigBee Alliance.

<<http://www.zigbee.org/>>

**[GE]** Estudio comparativo de General Electric: ZigBee vs WiFi en redes de sensores.

<<https://tecnologiayterritorio.wordpress.com/2013/01/03/zigbee-vs-wifi-en-redes-de-sensores-estudio-comparativo-de-general-electric/>>



[Z-SShare] Slide Share: ZigBee Technology. Lovely Professional University (Phagwara), School of Electronics & Communication Engineering.

<<http://www.slideshare.net/Hardeep8484/zigbee-technology-16416392>>

[ITRI] Jin-Shyan Lee, Yu-Wei Su y Chung-Chou Shen (3 de Marzo de 2008). Industrial Technology Research Institute (ITRI), Hsinchu, Taiwan: *"A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi"*.

[DIGI] DIGI International: empresa líder en conectividad.

<<https://www.digi.com/>>

[Xbee] Módulos Xbee: manuales, videos y tutoriales.

<<http://xbee.cl/>>

[KDPOF] Knowledge Development for Plastic Optic Fibres.

<<http://www.kdpof.com/technology/what-is-pof/>>

[VampTech] Vamptech Ibérica. Soluciones en Polímeros Termoplásticos

<<http://www.vamptech-iberica.com/pbt.php>>

[Multisim] Entorno de simulación Multisim.

<<http://www.ni.com/multisim/esa/>>

[TL081] Hoja de características del Amplificador operacional de la marca STmicroelectronics.

<<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/f1/39/65/bf/5e/64/40/b0/CD00000491.pdf/files/CD00000491.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000491.pdf>>

[Unicrom] Electrónica Unicrom. Tutoriales de electrónica.

<<http://unicrom.com/caracteristicas-transistor-bipolar-modelo-ebbers-moll/>>

[ECIA] Electronic Components Industry Association.

<<http://www.ecianow.org/>>

[ThorLabs] Thorlabs, Inc.

<[https://www.thorlabs.com/about\\_us.cfm](https://www.thorlabs.com/about_us.cfm)>

[Sø] Søren Gundtoft, *"Wind Turbines"*, white paper del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Aarhus, 2009.

[Tokat] Pinar Tokat, *"Development and evaluation of a pitch regulator for a variable speed wind turbine"*, Tesis de Master de la Universidad Tecnológica de Chalmers, Departamento de Energía y Medio Ambiente, 2012.

[Pvs.T] Nick Fillion, Brian MacDonald y Alex Magill, *"Power Output vs. Turbine Blade Pitch Angle"*, white paper de la Universidad de Rochester, 2011.

**[Mulj&Butt]** Eduard Muljadi y C. P. Butterfield, “Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation”, IEEE Transactions on Industry Applications, 37(1), pp 240-246, 2001.

**[Arduino]** Arduino.

<<https://www.arduino.cc/>>

**[Aforum]** Entrada en el foro oficial de Arduino.

<<https://forum.arduino.cc/index.php?topic=84190.0>>

**[Aserial]** Comunicación serie en placas Arduino.

<<https://www.arduino.cc/en/Reference/Serial>>

**[Ai2c]** Comunicación I2C en placas Arduino.

<<http://www.prometec.net/bus-i2c/>>

**[Aspi]** Comunicación SPI en placas Arduino.

<<http://www.prometec.net/bus-spi/>>

**[AVR]** Manual de referencia de la compañía Atmel de la librería AVR

<[http://www.atmel.com/webdoc/avrlibcreferencemanual/group\\_\\_avr\\_\\_io.html](http://www.atmel.com/webdoc/avrlibcreferencemanual/group__avr__io.html)>

**[XBArduino]** Entrada específica de las placas Xbee en la página oficial de Arduino.

<<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoXbeeShield>>

**[FTDI]** Future Technology Devices International

<<http://www.ftdichip.com/>>

**[NI]** Página oficial de LabVIEW de National Instruments.

<<http://www.ni.com/labview/esa/>>

**[XBexplorer]** Producto en venta en SparkFun Electronics.

<<https://www.sparkfun.com/products/11812>>

**[VISA1]** Tutorial de National Instruments del recurso VISA.

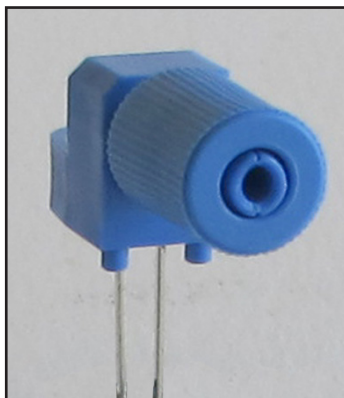
<<http://www.ni.com/tutorial/4478/es/>>

**[VISA2]** Descripción de National Instruments del recurso VISA.

<<https://www.ni.com/visa/>>

## ANEXOS

1. IF-E97
2. IF-D91
3. PM20A
4. TCRT5000
5. Módulos Xbee
6. ATMEGA328P



## APPLICATIONS

- Low Cost Analog and Digital Data Links
- Automotive Electronics
- Digitized Audio
- Medical Instruments
- PC-to-Peripheral Data Links
- Robotics Communications
- Motor Controller Triggering
- EMC/EMI Signal Isolation
- Local Area Networks
- Intra-System Links: Board-to-Board, Rack-to-Rack

## DESCRIPTION

The IF-E97 is a high-optical-output, visible red LED housed in a “connector-less” style plastic fiber optic package. The output spectrum is produced by a GaAlAs die which peaks at 660 nm, one of the optimal transmission windows of PMMA plastic optical fiber. The device package features an internal micro-lens and a precision-molded PBT housing to ensure efficient optical coupling with standard 1000  $\mu$ m core plastic fiber cable.

## APPLICATION HIGHLIGHTS

The high output and excellent linearity of the IF-E97 make it suitable for analog and digital data links. The IF-E97 can achieve data rates of 1 Mbps when used with an IF-D96 photologic detector. The visible red light has low attenuation in PMMA plastic fiber and aids in troubleshooting installations. The drive circuit design is simpler than required for laser diodes, making the IF-E97 the lowest cost selection for a variety of analog and digital applications requiring maximum operating distance.

## FEATURES

- ◆ High Optical Power
- ◆ Visible Red Output Aids Troubleshooting
- ◆ Low Transmission Loss with PMMA Plastic Fiber
- ◆ No Optical Design required
- ◆ Mates with standard 1000  $\mu$ m Core Jacketed Plastic Fiber Cable
- ◆ Internal Micro-Lens for Efficient Optical Coupling
- ◆ Inexpensive Plastic Connector Housing
- ◆ Connector-Less Fiber Termination
- ◆ Light-Tight Housing Provides Interference-Free Transmission
- ◆ RoHS compliant

## MAXIMUM RATINGS

( $T_A = 25^\circ\text{C}$ )

Operating and Storage Temperature Range ( $T_{OP}$ ,  $T_{STG}$ ).....-40°to 85°C  
 Junction Temperature ( $T_J$ ).....85°C  
 Soldering Temperature (2mm from case bottom) ( $T_S$ )  $t \leq 5$  s.....240°C  
 Reverse Voltage ( $V_R$ ).....5 V  
 Power Dissipation ( $P_{TOT}$ )  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .....100 mW  
 De-rate Above 25°C.....1.33 mW/°C  
 Forward Current, DC ( $I_F$ ).....40 mA  
 Surge Current ( $I_{FSM}$ )  $t \leq 100 \mu\text{s}$ .....200 mA

## CHARACTERISTICS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ )

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Peak Wavelength	$\lambda_{PEAK}$	650	660	670	nm
Full-Spectral Bandwidth (50% of $I_{MAX}$ )	$\Delta\lambda$	—	40	—	nm
Output Power Coupled into Plastic Fiber (1 mm core diameter). Distance Lens to Fiber $\leq 0.1$ mm, 1m polished fiber, $I_F = 20$ mA	$\Phi_{min}$	250 -6.0	325 -4.9	425 -3.7	$\mu\text{W}$ dBm
Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) ( $I_F = 20$ mA)	$t_r$ , $t_f$	—	.5	—	$\mu\text{s}$
Capacitance ( $F = 1$ MHz)	$C_0$	—	30	—	pF
Forward Voltage ( $I_F = 20$ mA)	$V_f$	1.7	1.9	2.1	V

**CAUTION:** The IF E97 is ESD sensitive. To minimize risk of damage observe appropriate precautions during handling and processing.

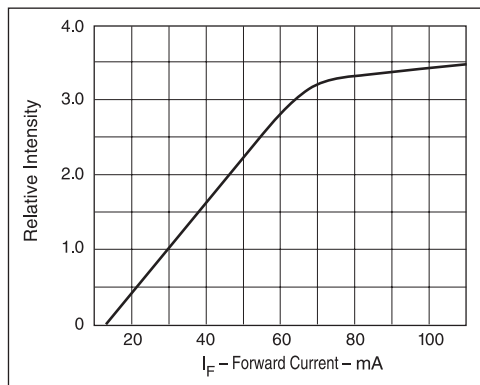


FIGURE 1. Normalized power launched versus forward current.

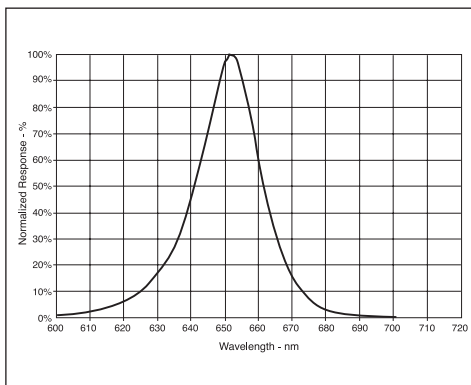


FIGURE 2. Typical spectral output versus wavelength.

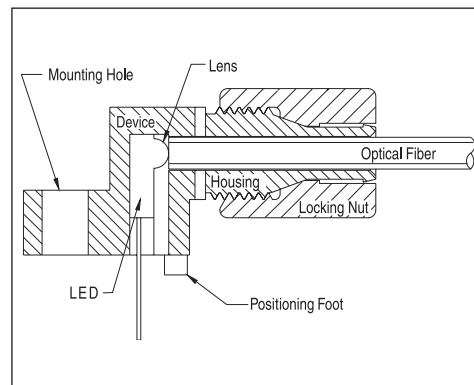


FIGURE 3. Cross-section of fiber optic device.

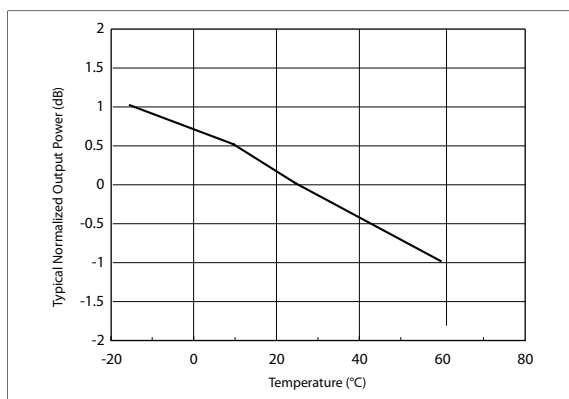
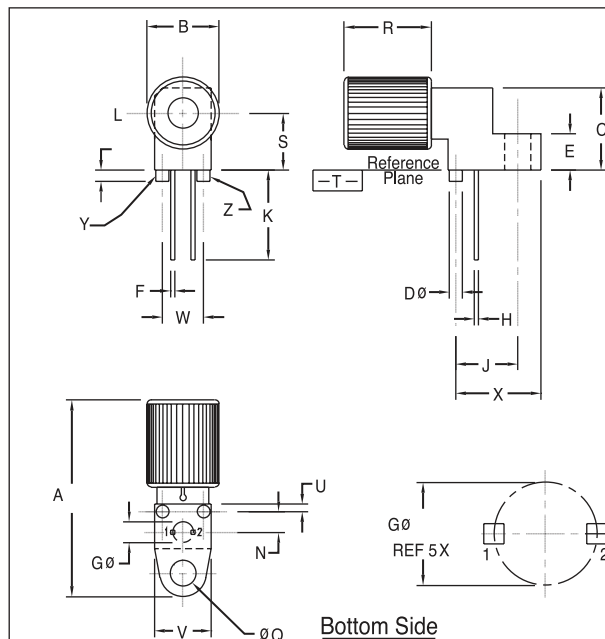


FIGURE 4. Output power versus temperature

## FIBER TERMINATION INSTRUCTIONS

1. Cut off the ends of the optical fiber with a single-edge razor blade or sharp knife. Try to obtain a precise 90-degree angle (square).
2. Insert the fiber through the locking nut and into the connector until the core tip seats against the internal micro-lens.
3. Screw the connector locking nut down to a snug fit, locking the fiber in place.



### NOTES:

1. Y AND Z ARE DATUM DIMENSIONS AND T IS A DATUM SURFACE.
2. POSITIONAL TOLERANCE FOR D  $\phi$  (2 PL):  
 $\phi 0.25 (0.010) \text{ M T Y M Z M}$
3. POSITIONAL TOLERANCE FOR F DIM (2 PL):  
 $\phi 0.25 (0.010) \text{ M T Y M Z M}$
4. POSITIONAL TOLERANCE FOR H DIM (2 PL):  
 $\phi 0.25 (0.010) \text{ M T Y M Z M}$
5. POSITIONAL TOLERANCE FOR Q  $\phi$  (2 PL):  
 $\phi 0.25 (0.010) \text{ M T Y M Z M}$
6. POSITIONAL TOLERANCE FOR B (2 PL):  
 $\phi 0.25 (0.010) \text{ M T}$
7. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
8. CONTROLLING DIMENSION: INCH

### PACKAGE IDENTIFICATION:

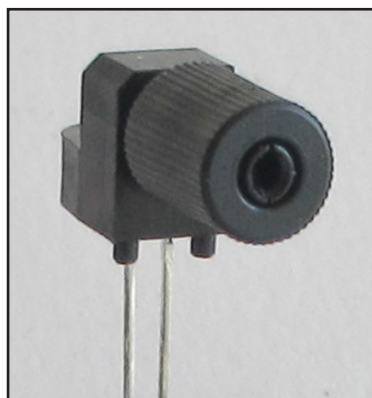
- ◆ Blue housing w/ Red dot
- PIN 1. Cathode
- PIN 2. Anode

	MILLIMETERS		INCHES	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	23.24	25.27	.915	.995
B	8.64	9.14	.340	.360
C	9.91	10.41	.390	.410
D	1.52	1.63	.060	.064
E	4.19	4.70	.165	.185
F	0.43	0.58	.017	.023
G	2.54 BSC		.100 BSC	
H	0.43	0.58	.017	.023
J	7.62 BSC		.300 BSC	
K	MIN 9.0		MIN .35	
L	1.14	1.65	.045	.065
N	2.54 BSC		.100 BSC	
Q	3.05	3.30	.120	.130
R	10.48	10.99	.413	.433
S	6.98 BSC		.275 BSC	
U	0.83	1.06	.032	.042
V	7.49	7.75	.295	.305
W	5.08 BSC		.200 BSC	
X	10.10	10.68	.397	.427

FIGURE 5. Case outline. Specifications are believed to be accurate but are subject to change. Industrial Fiber Optics assumes no responsibility for the consequences of using the information provided beyond replacement warranty for products not meeting stated specifications. Industrial Fiber Optics products are not authorized for use in life support applications without written approval from the President of Industrial Fiber Optics Corporation.

CAUTION:

- To avoid degraded device life due to package stress, do not bend or form leads outside the orientation shown on drawing.
- Ensure that solder flux does not migrate into the device and block the optical path, degrading the performance.
- If washing the device, liquid may become trapped in the part cavity. Ensure that all potentially corrosive materials are flushed out of the device.



## DESCRIPTION

The IF-D91 is a high-speed photodiode detector housed in a “connector-less” style plastic fiber optic package. Optical response of the IF-D91 extends from 450 to 1100 nm, making it compatible with a wide range of visible and nearinfrared LED and laser diode sources. This includes 650 nm visible red LEDs used for optimum transmission in PMMA plastic optic fiber. The detector package features an internal micro-lens and a precision-molded PBT housing to ensure efficient optical coupling with standard 1000  $\mu\text{m}$  core plastic fiber cable.

## APPLICATION HIGHLIGHTS

The fast response times of the IF-D91 make it suitable for high-speed digital data links. When used with an appropriate LED or laser diode source the IF-D91 is capable of 30 Mbps data rates. The IF-D91 also can be used in analog video links with bandwidths up to 25 MHz. The integrated design of the IF-D91 provides simple, cost-effective implementation in a variety of analog and digital applications.

## APPLICATIONS

- High-Speed Digital Data Links
- Local Area Networks
- Motor Controller Triggering
- Video Links
- Medical Instruments
- Automotive Electronics
- Robotics Communications
- EMC/EMI Signal Isolation
- Fiber Optic Modems

## FEATURES

- ◆ Fast Rise and Fall Times
- ◆ Mates with Standard 1000  $\mu\text{m}$  Core Jacketed Plastic Fiber Optic Cable
- ◆ No Optical Design Required
- ◆ Inexpensive Plastic Connector Housing
- ◆ Internal Micro-Lens for Efficient Optical Coupling
- ◆ Connector-Less Fiber Termination
- ◆ Light-Tight Housing provides Interference Free Transmission
- ◆ RoHS Compliant

## MAXIMUM RATINGS

 $(T_A = 25^\circ\text{C})$ 

Operating Temperature Range  
(T<sub>OP</sub>).....-30°to 80°C

Storage Temperature Range  
(T<sub>STG</sub>).....-40°to 80°C

Junction Temperature ( $T_J$ ).....80°C

Soldering Temperature  
(2mm from case bottom)  
(T<sub>s</sub>) t ≤ 5 s.....260°C

Power Dissipation  
(P<sub>TOT</sub>) T<sub>A</sub> = 25°C.....100 mW

De-rate Above 25°C.....1.8 mW/°C

### CHARACTERISTICS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ )

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Wavelength for Maximum Photosensitivity	$\lambda_{\text{PEAK}}$	-	920	-	nm
Spectral Bandwidth (S=10% of S <sub>MAX</sub> )	$\Delta\lambda$	450	-	1050	nm
Rise and Fall Times (10% to 90% and 90% to 10%) (R <sub>L</sub> =50 $\Omega$ , V <sub>R</sub> =20V, $\lambda$ =850 nm)	t <sub>r</sub> , t <sub>f</sub>	-	15	-	ns
Total Capacitance (V <sub>R</sub> =20 V, E <sub>E</sub> =0, f=1.0MHz)	C <sub>T</sub>	-	4	-	pF
Responsivity min. @ 880 nm @ 632 nm	R	- -	0.5 0.4	- -	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$ $\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Reverse Dark Current (V <sub>R</sub> =30 volts, E <sub>E</sub> =0)	I <sub>D</sub>	-	-	10	nA
Reverse Breakdown Voltage	V <sub>(BR)</sub> R	40	-	-	V
Forward Voltage	V <sub>f</sub>	-	0.7	-	V

**CAUTION:** The IF D91 is ESD sensitive. To minimize risk of damage observe appropriate precautions during handling and processing.

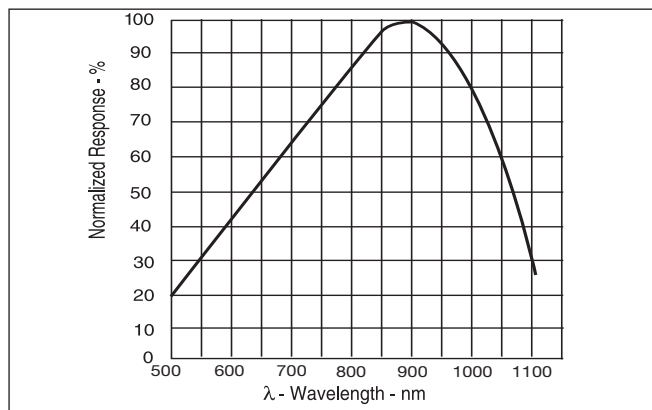


FIGURE 1. Typical detector response versus wavelength.

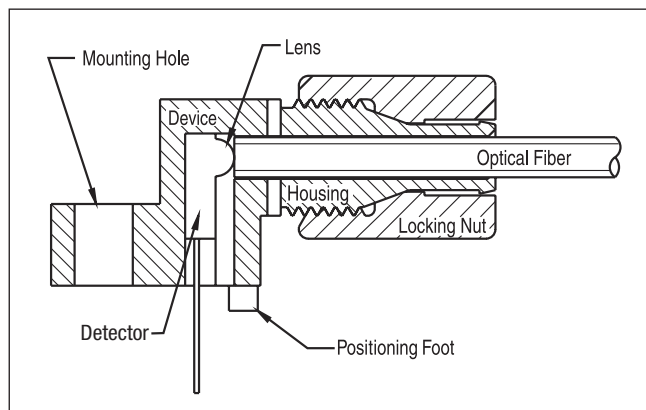


FIGURE 3. Cross-section of fiber optic device.

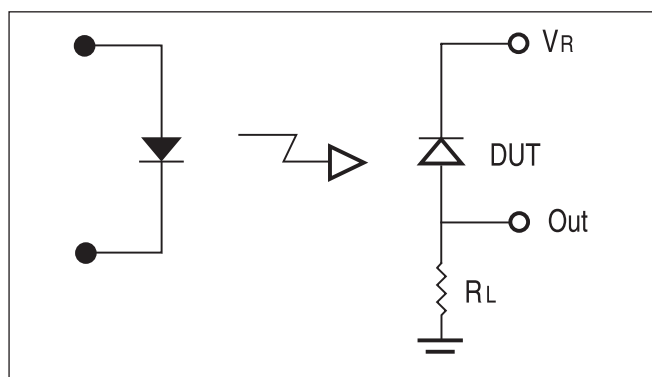


FIGURE 2. Circuit diagram for measuring rise and fall times.

## FIBER TERMINATION INSTRUCTIONS

1. Cut off the ends of the optical fiber with a single-edge razor blade or sharp knife. Try to obtain a precise 90-degree angle (square).
2. Insert the fiber through the locking nut and into the connector until the core tip seats against the internal micro-lens.
3. Screw the connector locking nut down to a snug fit, locking the fiber in place.

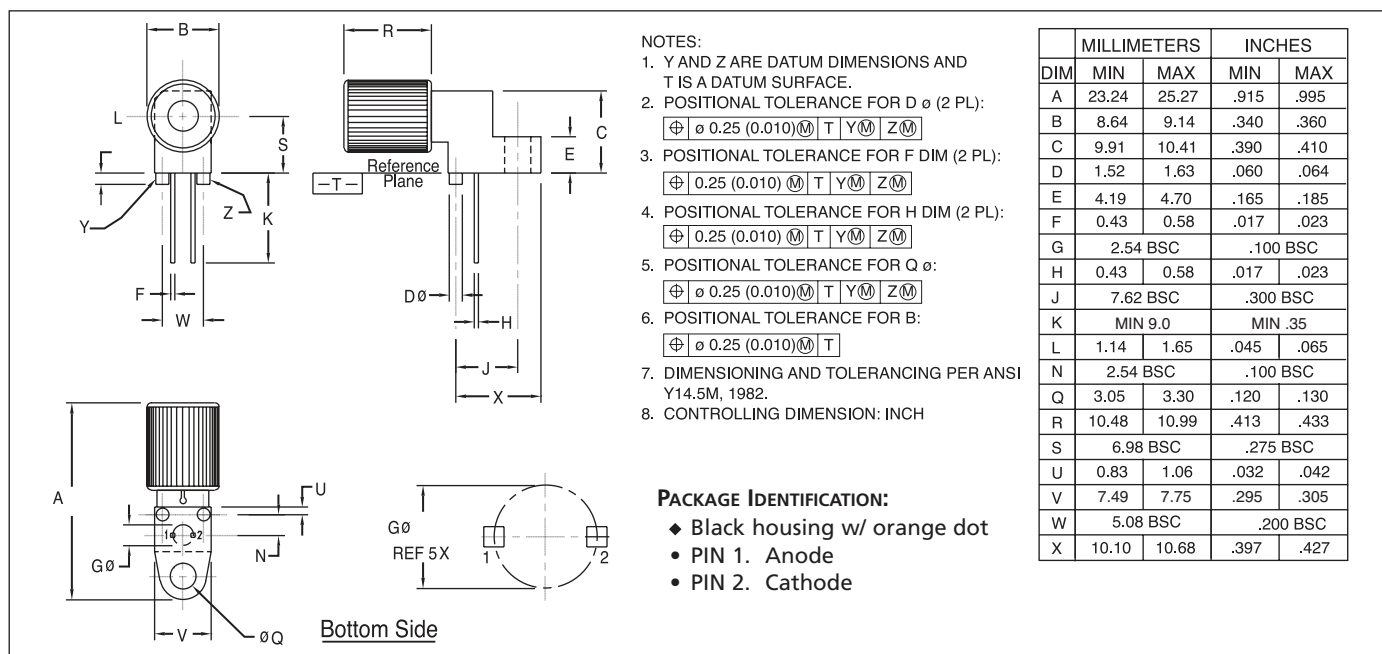


FIGURE 4. Case outline. Specifications are believed to be accurate but are subject to change. Industrial Fiber Optics assumes no responsibility for the consequences of using the information provided beyond replacement warranty for products not meeting stated specifications. Industrial Fiber Optics products are not authorized for use in life support applications without written approval from the President of Industrial Fiber Optics Corporation.

**CAUTION:**

- To avoid degraded device life due to package stress, do not bend or form leads outside the orientation shown on drawing.
- Ensure that solder flux does not migrate into the device and block the optical path, degrading the performance.
- If washing the device, liquid may become trapped in the part cavity. Ensure that all potentially corrosive materials are flushed out of the device.

## 4 Appendix

### 4.1 Technical Data

Model	PM20A	PM20C	PM20CH
Sensor Specifications			
Optical Power Range	-60 dBm to +16 dBm	-65 dBm to +13 dBm	-50 dBm to +23 dBm
Spectral Range	400 to 1100 nm	800 to 1700 nm	
Detector Type	Si	InGaAs	InGaAs
Sensor Size	3.6 x 3.6 mm	Ø 2 mm	
Input Aperture	3.6 x 3.6 mm	Ø 2 mm	
Aperture Thread	0.535-40 (SM05 Compatible) for PM20 Fiber Adapters FC Fiber Adapter Included		
Measurement Uncertainty	± 0.25 dB		
Measurement Standard	NIST Traceable		
Optical Damage Threshold	50 W/cm²		
General Specifications			
Display Type	Alphanumeric 8-Digits LCD		
Display Format	4 Digit Read Out with Units and Symbols		
Power Units	dBm, dB, nW, µW, mW		
Resolution	14bit		
Sample Rate	10Hz		
Dimensions (H x W x D)	125 x 80 x 39 mm (4.9" x 3.1" x 1.5"), with Holster		
Weight	0.2kg (0.44 lbs)		
Operating Temperature	5 °C - 40 °C ¹)		
Storage Temperature	-20 °C - 70 °C		
Power Management			
Battery Operation	Internal NiMH Battery Pack, 150 mAh, 6 V		
Operating Time	≥ 50 hours		
Shutdown	Manual / Auto 5 minutes / Auto 60 minutes		
Charger	3 hours Battery Charger Included		
Charger Power Supply	In: 90 to 264 V AC, 50 - 60 Hz; Out: 12 V DC @ 0.85 A		
Safety	CE Compliant		

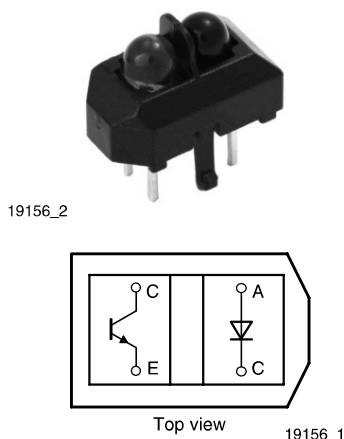
<sup>1)</sup> non-condensing

All technical data are valid at 23 ± 5°C and 45 ± 15% rel. humidity (non condensing)





## Reflective Optical Sensor with Transistor Output



### FEATURES

- Package type: leaded
- Detector type: phototransistor
- Dimensions (L x W x H in mm): 10.2 x 5.8 x 7
- Peak operating distance: 2.5 mm
- Operating range within > 20 % relative collector current: 0.2 mm to 15 mm
- Typical output current under test:  $I_C = 1$  mA
- Daylight blocking filter
- Emitter wavelength: 950 nm
- Lead (Pb)-free soldering released
- Compliant to RoHS directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC

**RoHS**  
COMPLIANT

### DESCRIPTION

The TCRT5000 and TCRT5000L are reflective sensors which include an infrared emitter and phototransistor in a leaded package which blocks visible light. The package includes two mounting clips. TCRT5000L is the long lead version.

### APPLICATIONS

- Position sensor for shaft encoder
- Detection of reflective material such as paper, IBM cards, magnetic tapes etc.
- Limit switch for mechanical motions in VCR
- General purpose - wherever the space is limited

### PRODUCT SUMMARY

PART NUMBER	DISTANCE FOR MAXIMUM CTR <sub>rel</sub> <sup>(1)</sup> (mm)	DISTANCE RANGE FOR RELATIVE $I_{out} > 20\%$ (mm)	TYPICAL OUTPUT CURRENT UNDER TEST <sup>(2)</sup> (mA)	DAYLIGHT BLOCKING FILTER INTEGRATED
TCRT5000	2.5	0.2 to 15	1	Yes
TCRT5000L	2.5	0.2 to 15	1	Yes

#### Notes

(1) CTR: current transfere ratio,  $I_{out}/I_{in}$

(2) Conditions like in table basic charactristics/sensors

### ORDERING INFORMATION

ORDERING CODE	PACKAGING	VOLUME <sup>(1)</sup>	REMARKS
TCRT5000	Tube	MOQ: 4500 pcs, 50 pcs/tube	3.5 mm lead length
TCRT5000L	Tube	MOQ: 2400 pcs, 48 pcs/tube	15 mm lead length

#### Note

(1) MOQ: minimum order quantity

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS <sup>(1)</sup>

PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
<b>INPUT (EMITTER)</b>				
Reverse voltage		$V_R$	5	V
Forward current		$I_F$	60	mA
Forward surge current	$t_p \leq 10 \mu s$	$I_{FSM}$	3	A
Power dissipation	$T_{amb} \leq 25^\circ C$	$P_V$	100	mW
Junction temperature		$T_j$	100	$^\circ C$

# TCRT5000, TCRT5000L

Vishay Semiconductors

Reflective Optical Sensor with  
Transistor Output



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS <sup>(1)</sup>				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
<b>OUTPUT (DETECTOR)</b>				
Collector emitter voltage		$V_{CEO}$	70	V
Emitter collector voltage		$V_{ECO}$	5	V
Collector current		$I_C$	100	mA
Power dissipation	$T_{amb} \leq 55\text{ }^{\circ}\text{C}$	$P_V$	100	mW
Junction temperature		$T_j$	100	$^{\circ}\text{C}$
<b>SENSOR</b>				
Total power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$P_{tot}$	200	mW
Ambient temperature range		$T_{amb}$	- 25 to + 85	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature range		$T_{stg}$	- 25 to + 100	$^{\circ}\text{C}$
Soldering temperature	2 mm from case, $t \leq 10\text{ s}$	$T_{sd}$	260	$^{\circ}\text{C}$

## Note

<sup>(1)</sup>  $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

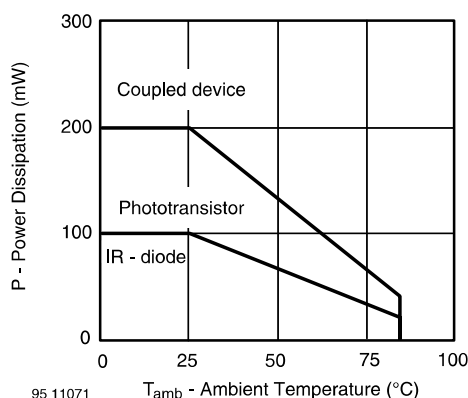


Fig. 1 - Power Dissipation Limit vs. Ambient Temperature

BASIC CHARACTERISTICS <sup>(1)</sup>						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
<b>INPUT (EMITTER)</b>						
Forward voltage	$I_F = 60\text{ mA}$	$V_F$		1.25	1.5	V
Junction capacitance	$V_R = 0\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$	$C_j$		17		pF
Radiant intensity	$I_F = 60\text{ mA}$ , $t_p = 20\text{ ms}$	$I_e$			21	mW/sr
Peak wavelength	$I_F = 100\text{ mA}$	$\lambda_P$	940			nm
Virtual source diameter	Method: 63 % encircled energy	$d$		2.1		mm
<b>OUTPUT (DETECTOR)</b>						
Collector emitter voltage	$I_C = 1\text{ mA}$	$V_{CEO}$	70			V
Emitter collector voltage	$I_e = 100\text{ }\mu\text{A}$	$V_{ECO}$	7			V
Collector dark current	$V_{CE} = 20\text{ V}$ , $I_F = 0\text{ A}$ , $E = 0\text{ lx}$	$I_{CEO}$		10	200	nA
<b>SENSOR</b>						
Collector current	$V_{CE} = 5\text{ V}$ , $I_F = 10\text{ mA}$ , $D = 12\text{ mm}$	$I_C^{(2)(3)}$	0.5	1	2.1	mA
Collector emitter saturation voltage	$I_F = 10\text{ mA}$ , $I_C = 0.1\text{ mA}$ , $D = 12\text{ mm}$	$V_{CEsat}^{(2)(3)}$			0.4	V

## Note

<sup>(1)</sup>  $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified

<sup>(2)</sup> See figure 3

<sup>(3)</sup> Test surface: mirror (Mfr. Spindler a. Hoyer, Part No. 340005)

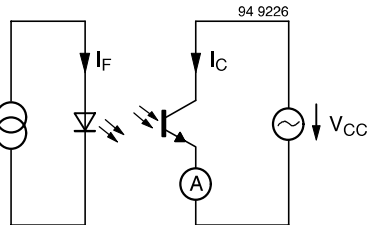


Fig. 2 - Test Circuit

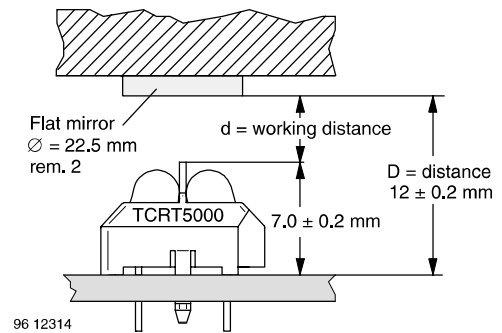


Fig. 3 - Test Circuit

### BASIC CHARACTERISTICS

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified

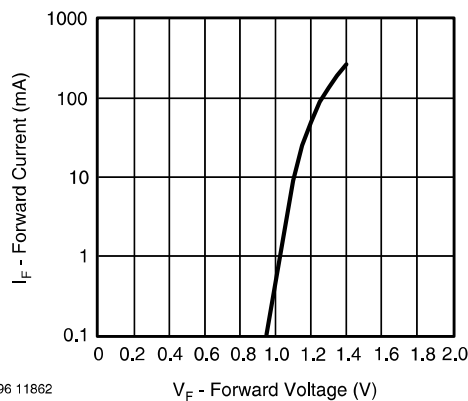


Fig. 4 - Forward Current vs. Forward Voltage

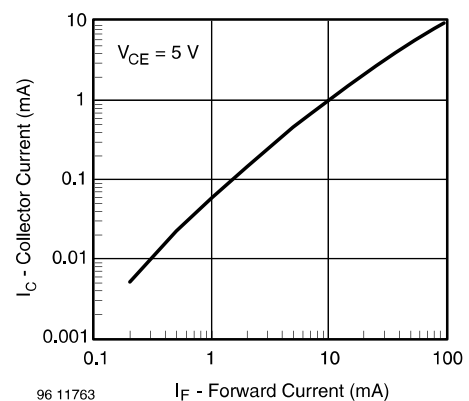


Fig. 6 - Collector Current vs. Forward Current

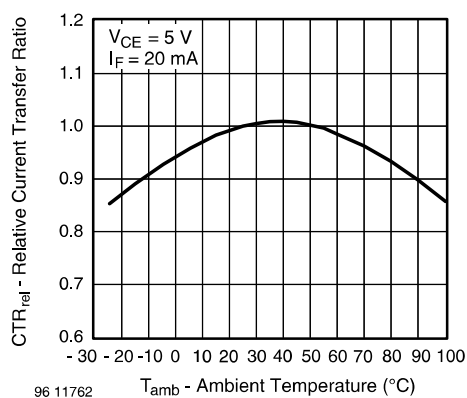


Fig. 5 - Relative Current Transfer Ratio vs. Ambient Temperature

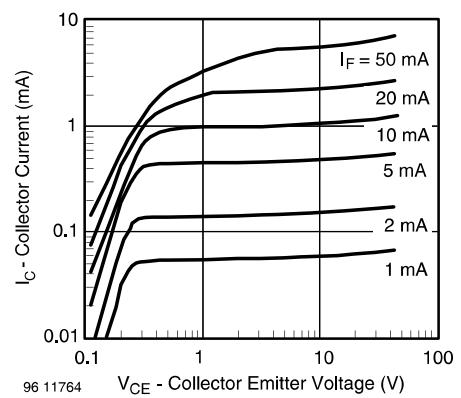


Fig. 7 - Collector Emitter Saturation Voltage vs. Collector Current

# TCRT5000, TCRT5000L

Vishay Semiconductors

Reflective Optical Sensor with  
Transistor Output

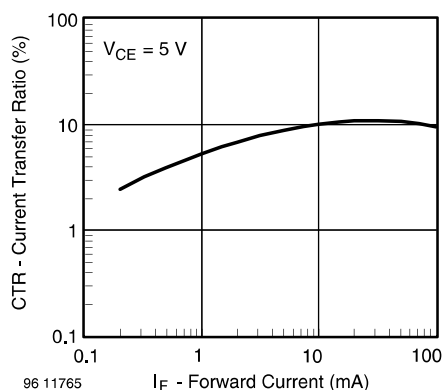


Fig. 8 - Current Transfer Ratio vs. Forward Current

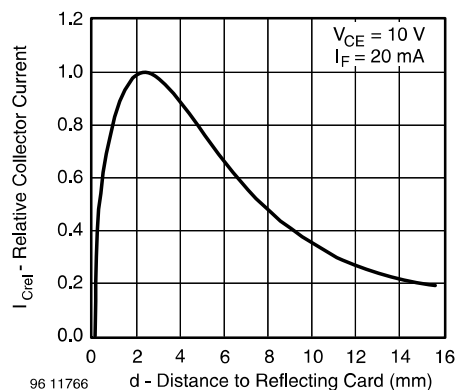
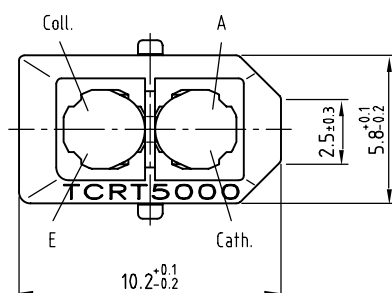
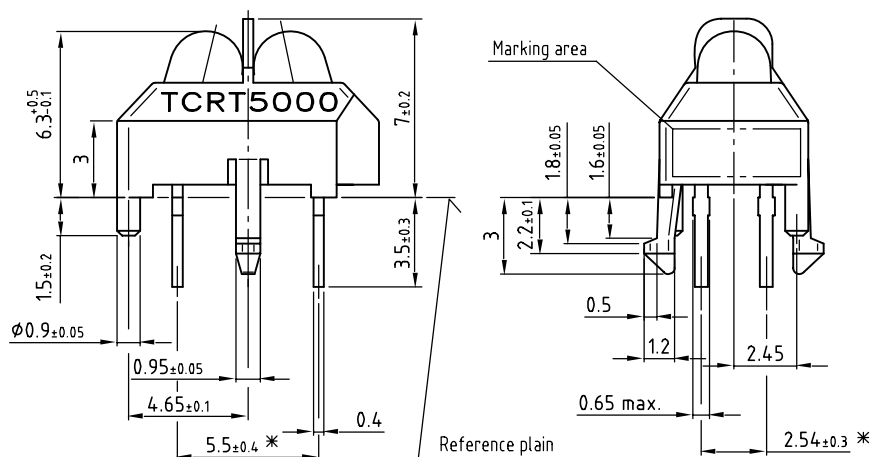


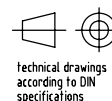
Fig. 9 - Relative Collector Current vs. Distance

## PACKAGE DIMENSIONS in millimeters, TCRT5000



\* Tolerances related  
to reference plain

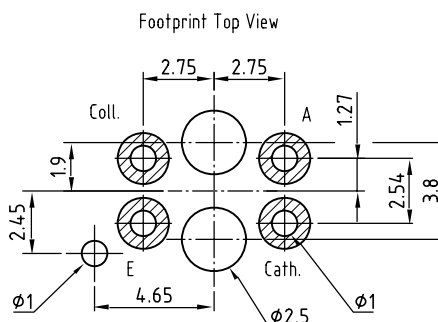
weight: ca. 0.23g



Drawing-No.: 6.550-5096.01-4

Issue: 4; 11.04.02

96 12073



# 1. XBee/XBee-PRO OEM RF Modules

The XBee and XBee-PRO OEM RF Modules were engineered to meet IEEE 802.15.4 standards and support the unique needs of low-cost, low-power wireless sensor networks. The modules require minimal power and provide reliable delivery of data between devices.

The modules operate within the ISM 2.4 GHz frequency band and are pin-for-pin compatible with each other.



## 1.1. Key Features

### Long Range Data Integrity

#### XBee

- Indoor/Urban: up to 100' (30 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 300' (100 m)
- Transmit Power: 1 mW (0 dBm)
- Receiver Sensitivity: -92 dBm

#### XBee-PRO

- Indoor/Urban: up to 300' (100 m)
- Outdoor line-of-sight: up to 1 mile (1500 m)
- Transmit Power: 100 mW (20 dBm) EIRP
- Receiver Sensitivity: -100 dBm

RF Data Rate: 250,000 bps

### Advanced Networking & Security

Retries and Acknowledgements  
DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)  
Each direct sequence channels has over 65,000 unique network addresses available  
Source/Destination Addressing  
Unicast & Broadcast Communications  
Point-to-point, point-to-multipoint and peer-to-peer topologies supported  
Coordinator/End Device operations

### Low Power

#### XBee

- TX Current: 45 mA (@3.3 V)
- RX Current: 50 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10  $\mu$ A

#### XBee-PRO

- TX Current: 215 mA (@3.3 V)
- RX Current: 55 mA (@3.3 V)
- Power-down Current: < 10  $\mu$ A

### ADC and I/O line support

Analog-to-digital conversion, Digital I/O  
I/O Line Passing

### Easy-to-Use

No configuration necessary for out-of box RF communications  
Free X-CTU Software  
(Testing and configuration software)  
AT and API Command Modes for configuring module parameters  
Extensive command set  
Small form factor

### Free & Unlimited RF-XPert Support

### 1.1.1. Worldwide Acceptance

**FCC Approval** (USA) Refer to Appendix A [p59] for FCC Requirements.  
Systems that contain XBee/XBee-PRO RF Modules inherit MaxStream Certifications.

ISM (Industrial, Scientific & Medical) **2.4 GHz frequency band**

Manufactured under **ISO 9001:2000** registered standards

XBee/XBee-PRO RF Modules are optimized for use in the **United States, Canada, Australia, Israel and Europe**. Contact MaxStream for complete list of government agency approvals.



## 1.2. Specifications

Table 1-01. Specifications of the XBee/XBee-PRO OEM RF Modules

Specification	XBee	XBee-PRO
<b>Performance</b>		
Indoor/Urban Range	up to 100 ft. (30 m)	Up to 300' (100 m)
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 300 ft. (100 m)	Up to 1 mile (1500 m)
Transmit Power Output (software selectable)	1mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm) conducted, 100 mW (20 dBm) EIRP*
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-92 dBm (1% packet error rate)	-100 dBm (1% packet error rate)
<b>Power Requirements</b>		
Supply Voltage	2.8 – 3.4 V	2.8 – 3.4 V
Transmit Current (typical)	45mA (@ 3.3 V)	If PL=0 (10dBm): 137mA(@3.3V), 139mA(@3.0V) PL=1 (12dBm): 155mA (@3.3V), 153mA(@3.0V) PL=2 (14dBm): 170mA (@3.3V), 171mA(@3.0V) PL=3 (16dBm): 188mA (@3.3V), 195mA(@3.0V) PL=4 (18dBm): 215mA (@3.3V), 227mA(@3.0V)
Idle / Receive Current (typical)	50mA (@ 3.3 V)	55mA (@ 3.3 V)
Power-down Current	< 10 $\mu$ A	< 10 $\mu$ A
<b>General</b>		
Operating Frequency	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector
<b>Networking &amp; Security</b>		
Supported Network Topologies	Point-to-point, Point-to-multipoint & Peer-to-peer	
Number of Channels (software selectable)	16 Direct Sequence Channels	12 Direct Sequence Channels
Addressing Options	PAN ID, Channel and Addresses	PAN ID, Channel and Addresses
<b>Agency Approvals</b>		
United States (FCC Part 15.247)	OUR-XBEE	OUR-XBEEPRO
Industry Canada (IC)	4214A XBEE	4214A XBEEPRO
Europe (CE)	ETSI	ETSI (Max. 10 dBm transmit power output)*
Japan	n/a	005NYCA0378 (Max. 10 dBm transmit power output)**

\* When operating in Europe: XBee-PRO RF Modules must be configured to operate at a maximum transmit power output level of 10 dBm. The power output level is set using the PL command. The PL parameter must equal "0" (10 dBm).

Additionally, European regulations stipulate an EIRP power maximum of 12.86 dBm (19 mW) for the XBee-PRO and 12.11 dBm for the XBee when integrating high-gain antennas.

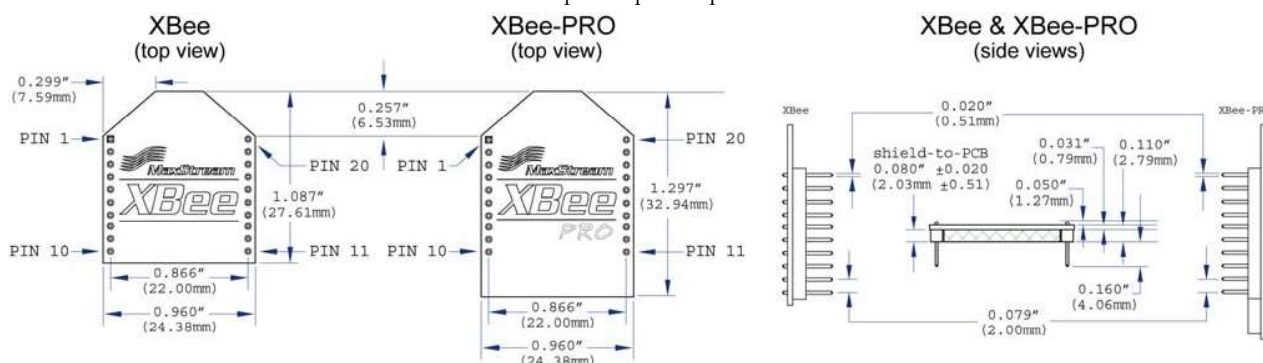
\*\* When operating in Japan: Transmit power output is limited to 10 dBm. A special part number is required when ordering modules approved for use in Japan. Contact MaxStream for more information [call 1-801-765-9885 or send e-mails to sales@maxstream.net].

Antenna Options: The ranges specified are typical when using the integrated Whip (1.5 dBi) and Dipole (2.1 dBi) antennas. The Chip antenna option provides advantages in its form factor; however, it typically yields shorter range than the Whip and Dipole antenna options when transmitting outdoors. For more information, refer to the "XBee Antenna" application note located on MaxStream's web site (<http://www.maxstream.net/support/knowledgebase/article.php?kb=153>).

### 1.3. Mechanical Drawings

Figure 1-01. Mechanical drawings of the XBee/XBee-PRO OEM RF Modules (antenna options not shown)

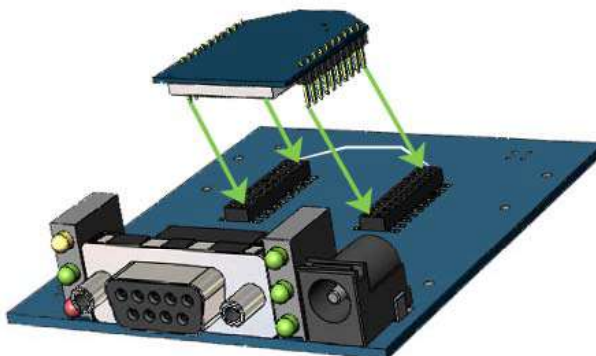
The XBee and XBee-PRO RF Modules are pin-for-pin compatible.



### 1.4. Mounting Considerations

The XBee/XBee-PRO RF Module was designed to mount into a receptacle (socket) and therefore does not require any soldering when mounting it to a board. The XBee Development Kits contain RS-232 and USB interface boards which use two 20-pin receptacles to receive modules.

Figure 1-02. XBee Module Mounting to an RS-232 Interface Board.



The receptacles used on MaxStream development boards are manufactured by Century Interconnect. Several other manufacturers provide comparable mounting solutions; however, MaxStream currently uses the following receptacles:

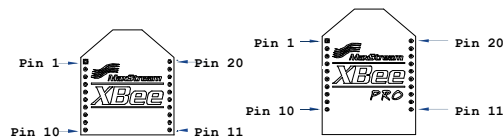
- Through-hole single-row receptacles -  
Samtec P/N: MMS-110-01-L-SV (or equivalent)
- Surface-mount double-row receptacles -  
Century Interconnect P/N: CPRMSL20-D-0-1 (or equivalent)
- Surface-mount single-row receptacles -  
Samtec P/N: SMM-110-02-SM-S

MaxStream also recommends printing an outline of the module on the board to indicate the orientation the module should be mounted.

## 1.5. Pin Signals

**Figure 1-03. XBee/XBee-PRO RF Module Pin Numbers**

(top sides shown - shields on bottom)



**Table 1-02. Pin Assignments for the XBee and XBee-PRO Modules**

(Low-asserted signals are distinguished with a horizontal line above signal name.)

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DO8*	Output	Digital Output 8
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI	Output	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator
7	PWM1	Output	PWM Output 1
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ / DI8	Input	Pin Sleep Control Line or Digital Input 8
10	GND	-	Ground
11	AD4 / DIO4	Either	Analog Input 4 or Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator
14	VREF	Input	Voltage Reference for A/D Inputs
15	Associate / AD5 / DIO5	Either	Associated Indicator, Analog Input 5 or Digital I/O 5
16	RTS / AD6 / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Analog Input 6 or Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0	Either	Analog Input 0 or Digital I/O 0

\* Function is not supported at the time of this release

### Design Notes:

- Minimum connections: VCC, GND, DOUT & DIN
- Minimum connections for updating firmware: VCC, GND, DIN, DOUT, RTS & DTR
- Signal Direction is specified with respect to the module
- Module includes a 50k  $\Omega$  pull-up resistor attached to RESET
- Several of the input pull-ups can be configured using the PR command
- Unused pins should be left disconnected



## 1.6. Electrical Characteristics

Table 1-03. DC Characteristics (VCC = 2.8 - 3.4 VDC)

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V <sub>IL</sub>	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	0.35 * VCC	V
V <sub>IH</sub>	Input High Voltage	All Digital Inputs	0.7 * VCC	-	-	V
V <sub>OL</sub>	Output Low Voltage	I <sub>OL</sub> = 2 mA, VCC ≥ 2.7 V	-	-	0.5	V
V <sub>OH</sub>	Output High Voltage	I <sub>OH</sub> = -2 mA, VCC ≥ 2.7 V	VCC - 0.5	-	-	V
I <sub>IIN</sub>	Input Leakage Current	V <sub>IN</sub> = VCC or GND, all inputs, per pin	-	0.025	1	μA
I <sub>IOZ</sub>	High Impedance Leakage Current	V <sub>IN</sub> = VCC or GND, all I/O High-Z, per pin	-	0.025	1	μA
TX	Transmit Current	VCC = 3.3 V	-	45 (XBee)	215 (PRO)	mA
RX	Receive Current	VCC = 3.3 V	-	50 (XBee)	55 (PRO)	mA
PWR-DWN	Power-down Current	SM parameter = 1	-	< 10	-	μA

Table 1-04. ADC Characteristics (Operating)

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V <sub>REFH</sub>	VREF - Analog-to-Digital converter reference range		2.08	-	V <sub>DDAD</sub>	V
I <sub>REF</sub>	VREF - Reference Supply Current	Enabled	-	200	-	μA
		Disabled or Sleep Mode	-	< 0.01	0.02	μA
V <sub>INDC</sub>	Analog Input Voltage <sup>1</sup>		V <sub>SSAD</sub> - 0.3	-	V <sub>DDAD</sub> + 0.3	V

1. Maximum electrical operating range, not valid conversion range.

Table 1-05. ADC Timing/Performance Characteristics<sup>1</sup>

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
R <sub>AS</sub>	Source Impedance at Input <sup>2</sup>		-	-	10	kΩ
V <sub>AIN</sub>	Analog Input Voltage <sup>3</sup>		V <sub>REFL</sub>		V <sub>REFH</sub>	V
RES	Ideal Resolution (1 LSB) <sup>4</sup>	2.08V ≤ V <sub>DDAD</sub> ≤ 3.6V	2.031	-	3.516	mV
DNL	Differential Non-linearity <sup>5</sup>		-	±0.5	±1.0	LSB
INL	Integral Non-linearity <sup>6</sup>		-	±0.5	±1.0	LSB
E <sub>ZS</sub>	Zero-scale Error <sup>7</sup>		-	±0.4	±1.0	LSB
F <sub>FS</sub>	Full-scale Error <sup>8</sup>		-	±0.4	±1.0	LSB
E <sub>IL</sub>	Input Leakage Error <sup>9</sup>		-	±0.05	±5.0	LSB
E <sub>TU</sub>	Total Unadjusted Error <sup>10</sup>		-	±1.1	±2.5	LSB

1. All ACCURACY numbers are based on processor and system being in WAIT state (very little activity and no IO switching) and that adequate low-pass filtering is present on analog input pins (filter with 0.01 μF to 0.1 μF capacitor between analog input and VREFL). Failure to observe these guidelines may result in system or microcontroller noise causing accuracy errors which will vary based on board layout and the type and magnitude of the activity.

Data transmission and reception during data conversion may cause some degradation of these specifications, depending on the number and timing of packets. It is advisable to test the ADCs in your installation if best accuracy is required.

2. R<sub>AS</sub> is the real portion of the impedance of the network driving the analog input pin. Values greater than this amount may not fully charge the input circuitry of the ATD resulting in accuracy error.

3. Analog input must be between V<sub>REFL</sub> and V<sub>REFH</sub> for valid conversion. Values greater than V<sub>REFH</sub> will convert to \$3FF.

4. The resolution is the ideal step size or 1LSB = (V<sub>REFH</sub> - V<sub>REFL</sub>)/1024

5. Differential non-linearity is the difference between the current code width and the ideal code width (1LSB). The current code width is the difference in the transition voltages to and from the current code.

6. Integral non-linearity is the difference between the transition voltage to the current code and the adjusted ideal transition voltage for the current code. The adjusted ideal transition voltage is (Current Code - 1/2) \* (1 / ((V<sub>REFH</sub> + E<sub>FS</sub>) - (V<sub>REFL</sub> + E<sub>ZS</sub>))).

7. Zero-scale error is the difference between the transition to the first valid code and the ideal transition to that code. The Ideal transition voltage to a given code is (Code - 1/2) \* (1 / (V<sub>REFH</sub> - V<sub>REFL</sub>)).

8. Full-scale error is the difference between the transition to the last valid code and the ideal transition to that code. The ideal transition voltage to a given code is (Code - 1/2) \* (1 / (V<sub>REFH</sub> - V<sub>REFL</sub>)).

9. Input leakage error is error due to input leakage across the real portion of the impedance of the network driving the analog pin. Reducing the impedance of the network reduces this error.

10. Total unadjusted error is the difference between the transition voltage to the current code and the ideal straight-line transfer function. This measure of error includes inherent quantization error (1/2LSB) and circuit error (differential, integral, zero-scale, and full-scale) error. The specified value of E<sub>TU</sub> assumes zero E<sub>IL</sub> (no leakage or zero real source impedance).

---

**ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES  
IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH****DATASHEET**

---

**Features**

---

- High Performance, Low Power Atmel® AVR® 8-Bit Microcontroller Family
- Advanced RISC Architecture
  - 131 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 20 MIPS Throughput at 20MHz
  - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
  - 4/8/16/32KBytes of In-System Self-Programmable Flash program memory
  - 256/512/512/1KBytes EEPROM
  - 512/1K/1K/2KBytes Internal SRAM
  - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
  - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C<sup>(1)</sup>
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
    - In-System Programming by On-chip Boot Program
    - True Read-While-Write Operation
  - Programming Lock for Software Security
- Atmel® QTouch® library support
  - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
  - QTouch and QMatrix® acquisition
  - Up to 64 sense channels
- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
  - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Six PWM Channels
  - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
    - Temperature Measurement
  - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
    - Temperature Measurement
  - Programmable Serial USART
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Byte-oriented 2-wire Serial Interface (Philips I<sup>2</sup>C compatible)
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
  - Interrupt and Wake-up on Pin Change

- Special Microcontroller Features
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
  - 23 Programmable I/O Lines
  - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- Operating Voltage:
  - 1.8 - 5.5V
- Temperature Range:
  - -40°C to 85°C
- Speed Grade:
  - 0 - 4MHz@1.8 - 5.5V, 0 - 10MHz@2.7 - 5.5V, 0 - 20MHz @ 4.5 - 5.5V
- Power Consumption at 1MHz, 1.8V, 25°C
  - Active Mode: 0.2mA
  - Power-down Mode: 0.1µA
  - Power-save Mode: 0.75µA (Including 32kHz RTC)